

ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

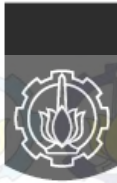
TUGAS AKHIR - TE141599

**Penempatan Optimal *Static VAR Compensator*
(SVC) Pada Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV
dengan Metode *Cuckoo Search Algorithm***

Muhammad Januar Fathoni
NRP 2211 100 151

Dosen Pembimbing
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

***Optimal Placement Static VAR Compensator (SVC) On
Java-Bali 500 kV Transmission System Using Cuckoo
Search Algorithm Method***

**Muhammad Januar Fathoni
NRP 2211100151**

Advisor

**Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.**

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industry Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016**

**PENEMPATAN OPTIMAL STATIC VAR COMPENSATOR
(SVC) PADA SISTEM TRANSMISI JAWA-BALI 500 KV
DENGAN METODE CUCKOO SEARCH ALGORITHM**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Gunz Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjanz Teknik**

**Pada
Bidang Studi/Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 197411292000121001

Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.
NIP. 198811032012121001

**SURABAYA
DESEMBER 2015**

ABSTRAK

Penempatan Optimal *Static VAR Compensator (SVC)* Pada Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV dengan Metode *Cuckoo Search Algorithm*

Muhammad Januar Fathoni

2211100151

Dosen Pembimbing 1 : Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

Dosen Pembimbing 2 : Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

Abstrak

Beberapa tahun terakhir rasio elektrifikasi semakin meningkat. Hal ini memicu semakin meningkatnya jumlah permintaan beban listrik di masyarakat. Namun peningkatan pembebanan ini tidak diimbangi dengan penambahan pembangkit ataupun sistem transmisi. Hal ini menyebabkan kerugian baik dari sisi produsen tenaga listrik maupun dari sisi konsumen. Sehingga hal tersebut menuntut produsen tenaga listrik untuk meningkatkan kualitas tenaga listrik yang diproduksinya. Untuk mengatasi masalah tersebut pada sistem dapat dipasang peralatan bernama SVC (*Static Var Compensator*). SVC adalah peralatan kompensasi yang mampu menginjeksikan daya reaktif pada sistem. Namun penentuan yang kurang optimal tidak mampu memperbaiki profil tegangan secara signifikan. Oleh karena itu dibutuhkan sebuah metode optimasi untuk mendapatkan hasil optimal. Pada tugas akhir ini digunakan metode *Cuckoo Search Algorithm* untuk mengoptimalkan penentuan lokasi penempatan SVC pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV agar diperoleh perbaikan profil tegangan yang optimum. Setelah dilakukan pemodelan sistem dan simulasi pencarian penempatan optimal SVC didapatkan hasil sebagai berikut. Pada simulasi pertama didapatkan bahwa penempatan SVC mampu menurunkan rugi daya saluran sebesar 16,776 MW. Pada simulasi kedua didapatkan bahwa penempatan SVC mampu menurunkan rugi daya saluran sebesar 13,867 MW. Pada simulasi ketiga didapatkan bahwa penempatan SVC mampu menurunkan rugi daya saluran sebesar 15,765 MW. Pada simulasi yang telah dilakukan, tegangan pada bus 14, 19, 20, 21 mengalami perbaikan profil tegangan sesuai standar yang diizinkan.

Kata kunci: Profil tegangan, SVC, *Cuckoo Search Algorithm*

ABSTRACT

Optimal Placement of Static VAR Compensators (SVC) On Jawa-Bali 500 KV Transmission System Using Cuckoo Search Algorithm Method

Muhammad Januar Fathoni

2211100151

Advisor 1 : Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

Advisor 2 : Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

Abstract

In the last few years the electrification ratio has increased. This situation increasing electric load demand. However, the increasing of electric load demand are not followed by the addition of transmission lines and power plant. This led to the loss of the electric power producers as well as from the side of the consumer. Because of it, the electric power producer are prosecuted to improve electric power quality. To fix the issue on the system can be mounted equipment named SVC (Static Var Compensator). SVC is an electrical equipment that is able to inject reactive power on the system. But an inappropriate location and capacity of SVC will not be able to improve voltage profile significantly. Therefore, it is needed an optimization method to get optimum results. Because of it, in this final project using Cuckoo Search Algorithm for optimizing determination of location placement and capacity SVC on the Jawa-Bali transmission system 500 kV voltage profile improvements. After system modelling and searching simulation of optimal placement SVC have done, we get some results. In the first simulation, founded that SVC could decrease transmission lines losses about 16,776 MW. In the second simulation, founded that SVC could decrease transmission lines losses about 13,867 MW. And in the third simulation SVC could decrease transmission lines losses about 16,776 MW. In all of that simulation, voltage profile at bus 14, 19, 20, and 21 has improved as big as allowed voltage standard.

Keyword: Voltage profile, SVC, Cuckoo Search Algorithm

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin, segala puji bagi Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Penempatan Optimal Static VAR Compensator (SVC) Pada Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV dengan Metode Cuckoo Search Algorithm”**.

Dengan pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis bisa belajar lebih banyak dan meningkatkan apa yang telah didapatkan selama menempuh perkuliahan di Teknik Elektro ITS. Dengan Tugas Akhir ini penulis juga dapat menghasilkan suatu implementasi dari apa yang telah penulis pelajari.

Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan beberapa pihak. Sehingga pada kesempatan ini penulis mengucapkan syukur dan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa (Allah SWT)
2. Ayah (Suharto,S.E) , ibu (Zulia), dan segenap keluarga yang selalu mendukung dan mendoakan segala proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT. dan Bapak Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang selalu senantiasa membimbing penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh Dosen bidang studi Teknik Sistem Tenaga yang telah memberikan ilmu selama kuliah
5. Friska Ajeng Rizki yang senantiasa rela mendukung, memberikan semangat, dan membantu beberapa aspek pengerjaan Tugas Akhir ini.
6. Kawan-kawan asisten PSSSL yang telah mengizinkan *running* program di PC lab.
7. Rekan-rekan E-51 yang senantiasa mendukung pencarian informasi dan literatur Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki banyak kekurangan. Sehingga dengan kerendahan hati, penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca untuk perbaikan ke depannya.

Surabaya, Desember 2015

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Metode Penelitian	2
1.1 Studi Literatur.....	2
1.2 Pengumpulan Data.....	3
1.3 Simulasi Analisa Data	3
1.4 Penulisan Buku.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
1.7 Relevansi.....	3
BAB 2 KOMPENSASI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK	5
2.1 Faktor Daya dan Kompensasi Daya Reaktif	5
2.2 Kompensasi Beban.....	6
2.1 Kompensasi Paralel	6
2.3 Static Var Compensator (SVC).....	8
2.3.1 Bagian-Bagian SVC	9
2.3.2 Jenis SVC Berdasarkan Kontrol Yang Digunakan	12
2.3.3 Jenis SVC Berdasarkan Pemasangan Pada Transmisi	15
2.4 Analisis Aliran Daya	18
2.5 Alogaritma Metaheuristik	19
2.6 Tingkah Laku Perkembangbiakan Burung Kukuk (<i>Cuckoo</i>)	20
2.7 Algoritma <i>Cuckoo Search</i>	21
BAB 3 IMPLEMENTASI PENEMPATAN OPTIMAL STATIC VAR COMPENSATOR DENGAN METODE <i>CUCKOO SEARCH</i> <i>ALGORITHM</i>	25
3.1 Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV	25
3.2 Parameter Implementasi Algoritma CS	29
3.2.1 Inisiasi Parameter Algoritma Cuckoo Search	30

3.2.2 Analisis Aliran Daya Sistem Transmisi Jawabali 500 kV..	31
3.2.3 Inisiasi Parameter Algoritma <i>Cuckoo Search</i>	31
3.2.4 Pembangkitan Telur Cuckoo Via <i>Levy Flight</i>	32
3.2.5 Evaluasi Nilai <i>Fitness</i>	33
3.2.6 Batasan Operasional.....	35
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA	37
4.1 Aliran Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 k V Sebelum Kompensasi	37
4.2 Aliran Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 k V Sebelum Kompensasi	39
4.2.1 Hasil Percobaan 1	40
4.2.2 Hasil Percobaan 2	44
4.2.3 Hasil Percobaan 3	47
BAB 5 PENUTUP	53
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA.....	55
LAMPIRAN	57
A. Hasil Simulasi Jumlah Sarang (n) = 25	57
B. Hasil Simulasi Jumlah Sarang (n) = 50	62
C. Hasil Simulasi Jumlah Sarang (n) = 100	67
RIWAYAT HIDUP	73

CONTENTS

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
PREFACE.....	v
TABLE OF CONTENTS.....	vii
ILLUSTRATION.....	ix
TABLES.....	xiii
CHAPTER 1 PRELIMINARY.....	1
1.1 Background.....	1
1.2 Formulation Of Problems.....	2
1.3 Scope Of Problem.....	2
1.4 Purpose.....	2
1.5 Research Stages.....	2
1.5.1 Study of Literature.....	2
1.5.2 Data Collecting.....	3
1.5.3 Simulation and Data Analysis.....	3
1.5.4 Written of Book.....	3
1.6 Systematic Discussion.....	3
1.7 Relevance.....	4
CHAPTER 2 COMPENSATION ON POWER SYSTEMS.....	5
2.1 Power Factor dan Reactive Power Compensation.....	5
2.2 Load Compensation.....	6
2.2.1 Paralel Compensation.....	6
2.3 Static Var Compensator (SVC).....	7
2.1 Part of SVC.....	9
2.2 Type Of SVC Based On Controls Used.....	12
2.3 Type Of SVC Based On Controls Used Installation on Transmission Systems.....	15
2.4 Loadflow Analysis.....	18
2.5 Metaheuhistic Algorithm.....	19
2.6 Cuckoo Breeding Behaviour.....	20
2.7 Cuckoo Search Algorithm.....	21
CHAPTER 3 IMPLEMENTATION OF OPTIMAL PLACEMENT STATIC VAR COMPENSATOR WITH CUCKOO SEARCH ALGORITHM METHOD.....	25
3.1 Java-Bali 500 kV Transmission System.....	25
3.2 Implementation Parameter Of CS Algorithm.....	29
3.2.1 Cuckoo Search Algorithm Parameter Initiation.....	30

3.2.2 Loadflow Analysis Of Java-Bali 500 k V Transmission Systems	31
3.2.3 Cuckoo Search Parameter Initiation.....	31
3.2.4 Cuckoo Egg Generation Via Levy Flight.....	32
3.2.5 Fitness Value Evaluation.....	33
3.2.6 Operational Constraints.....	35
CHAPTER 4 ANALYSIS AND DATA SIMULATION	37
4.1 Loadflow Analysis On Java-Bali 500 kV Transmission Systems Before Compensation	37
4.2 Cuckoo Search Algorithm Simulation On Optimal Placement Of SVC	39
4.2.1 Experiment Results 1	40
4.2.2 Experiment Results 2	44
4.2.3 Experiment Results 3	47
CHAPTER 5 CONCLUSION	53
5.1 Conclusion	53
5.2 Recommendation	54
BIBLIOGRAPHY.....	55
ENCLOSURES	57
A. Simulation Result nest (n) = 25	57
B. Simulation Result nest (n) = 50	62
C. Simulation Result nest (n) = 100	67
BIOGRAPHY	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rangkaian Nominal Π Model Saluran Transmisi.....	7
Gambar 2.2 Single Line Diagram Konfigurasi SVC.....	8
Gambar 2.3 Thyristor Valve Tower.....	9
Gambar 2.4 Reaktor Pada Gardu Induk.....	10
Gambar 2.5 Kapasitor Pada Gardu Induk.....	11
Gambar 2.6 Sistem Pendingin SVC Pada Gardu Induk.....	11
Gambar 2.7 SVC Dengan TCRCR dan FC.....	13
Gambar 2.8 Pemodelan SVC Total Susceptance Variable Var Source.....	13
Gambar 2.9 SVC Dengan TCR Dan TSC.....	14
Gambar 2.10 Svc Menggunakan Selt-Commutated Inverters.....	15
Gambar 2.11 Gambar Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC).....	16
Gambar 2.12 Gambar Thyristor Controlled Phase Angle Regulator.....	17
Gambar 2.13 Gambar Unified Power Flow Controller.....	18
Gambar 2.14 Sepasang Burung Kukuk (Cuckoo) Jantan Dan Betina.....	21
Gambar 2.15 Pseudocode Cuckoo Search Algorithm.....	23
Gambar 2.16 Gambaran Sederhana Cuckoo Search Algorithm.....	24
Gambar 3.1 Sepasang Burung Kukuk (Cuckoo) Jantan dan Betina.....	21
Gambar 3.2 Pseudocode Cuckoo Search Algorithm.....	23
Gambar 3.3 Gambaran Sederhana Cuckoo Search Algorithm.....	24
Gambar 3.4 Diagram Alir Penentuan Optimal SVC dengan Cuckoo Search Algorithm.....	30
Gambar 4.1 Single Line Diagram Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 Kv.....	27
Gambar 4.2 Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Simulasi Pemasangan SVC dengan $n = 25$	43
Gambar 4.3 Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Simulasi Pemasangan SVC dengan $n = 25$ Pada Bus Kritis.....	43
Gambar 4.4 Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Simulasi Pemasangan SVC dengan $n = 50$	47
Gambar 4.5 Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Simulasi Pemasangan SVC dengan $n = 50$ Pada Bus Kritis.....	47
Gambar 4.6 Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Simulasi Pemasangan SVC dengan $n = 100$	51
Gambar 4.7 Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Simulasi Pemasangan SVC dengan $n = 100$ Pada Bus Kritis.....	51
Gambar A.1 Grafik Hasil Running Ke-1 Profil Tegangan Simulasi SVC $n = 25$	57

Gambar A.2 Grafik Hasil Running Ke-2 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25.....	57
Gambar A.3 Grafik Hasil Running Ke-3 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25.....	58
Gambar A.4 Grafik Hasil Running Ke-4 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25.....	58
Gambar A.5 Grafik Hasil Running Ke-5 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25.....	59
Gambar A.6 Grafik Hasil Running Ke-6 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25.....	59
Gambar A.7 Grafik Hasil Running Ke-7 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25.....	60
Gambar A.8 Grafik Hasil Running Ke-8 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25.....	60
Gambar A.9 Grafik Hasil Running Ke-9 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25.....	61
Gambar A.10 Grafik Hasil Running Ke-10 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25.....	61
Gambar B.1 Grafik Hasil Running Ke-1 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50.....	62
Gambar B.2 Grafik Hasil Running Ke-2 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50.....	62
Gambar B.3 Grafik Hasil Running Ke-3 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50.....	63
Gambar B.4 Grafik Hasil Running Ke-4 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50.....	63
Gambar B.5 Grafik Hasil Running Ke-5 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50.....	64
Gambar B.6 Grafik Hasil Running Ke-6 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50.....	64
Gambar B.7 Grafik Hasil Running Ke-7 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50.....	65
Gambar B.8 Grafik Hasil Running Ke-8 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50.....	65
Gambar B.9 Grafik Hasil Running Ke-9 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50.....	66
Gambar B.10 Grafik Hasil Running Ke-10 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50.....	66

Gambar C.1 Grafik Hasil Running Ke-1 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100	67
Gambar C.2 Grafik Hasil Running Ke-2 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100	67
Gambar C.3 Grafik Hasil Running Ke-3 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100	68
Gambar C.4 Grafik Hasil Running Ke-4 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100	68
Gambar C.5 Grafik Hasil Running Ke-5 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100	69
Gambar C.6 Grafik Hasil Running Ke-6 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100	69
Gambar C.7 Grafik Hasil Running Ke-7 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100	70
Gambar C.8 Grafik Hasil Running Ke-8 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100	70
Gambar C.9 Grafik Hasil Running Ke-9 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100	71
Gambar C.10 Grafik Hasil Running Ke-10 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100	71

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data beban sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV	26
Tabel 3.2 Data saluran transmisi Jawa-Bali 500 kV	28
Tabel 4.1 Aliran daya sistem transmisi Jawa-Bali 500 k V sebelum kompensasi SVC.....	37
Tabel 4.2 Rugi daya sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV sebelum kompensasi SVC.....	38
Tabel 4.3 Hasil aliran daya sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV simulasi dengan $n = 25$	41
Tabel 4.4 Rugi daya sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV simulasi dengan $n = 25$	42
Tabel 4.5 Hasil aliran daya sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV simulasi dengan $n = 50$	44
Tabel 4.6 Rugi daya sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV simulasi dengan $n = 50$	45
Tabel 4.7 Hasil aliran daya sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV simulasi dengan $n = 100$	49
Tabel 4.8 Rugi daya sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV simulasi dengan $n = 100$	49

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Beberapa tahun terakhir permintaan beban yang ada di masyarakat mengalami peningkatan yang signifikan. Hal ini menuntut produsen tenaga listrik untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas tenaga listrik yang diproduksinya. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan sebuah peralatan *Flexible AC Transmission System* (FACTS). *Flexible AC Transmission System* (FACTS) dalam suatu sistem tenaga memiliki peran penting dalam memperbaiki performa sistem tenaga, baik statis maupun dinamis. Bentuknya antara lain memperbaiki stabilitas, meningkatkan keandalan pembebanan dan mengurangi rugi daya. FACTS harus ditempatkan secara optimal untuk mengimplementasikan peran vital tersebut, karena biaya investasi pembangunan yang mahal. Salah satu jenis FACTS *device* yaitu Kompensator VAR Statis (SVC).

Static VAR Compensator (SVC) adalah alat yang dapat menghasilkan atau menyerap daya reaktif statis yang dihubungkan paralel dan mempunyai keluaran (*output*) yang bervariasi untuk menjaga atau mengontrol parameter spesifik dari suatu sistem tenaga listrik. *SVC* terdiri dari komponen *TCR (Thyristor Controlled Reactor)*, *TSC (Thyristor Switched Capacitor)* dan *Filter Capacitor (FC)*. Tujuan utama pemasangan *SVC* adalah untuk menjaga perubahan tegangan pada bus dalam jaringan distribusi serta untuk meningkatkan stabilitas tegangan dengan cara menyuntikkan daya reaktif dengan mengendalikan arus kapasitif atau arus induktif [1]. Permasalahan yang terjadi pada penggunaan peralatan ini adalah penentuan optimal *SVC* untuk dialokasikan dalam sistem tenaga listrik karena mahalnya biaya instalasi peralatan *Flexible AC Transmission System* (FACTS). Oleh karena itu untuk menyelesaikan masalah tersebut diperlukan suatu metode algoritma untuk membantu menentukan *SVC* yang optimum, berdasarkan pada faktor performansi dan biayanya. Salah satu metode optimasi untuk menyelesaikan masalah tersebut adalah *Cuckoo Search Algorithm*. *Cuckoo Search Algorithm* adalah metode algoritma modern yang terinspirasi dari kejadian alam, yang dikembangkan oleh Yang dan

Deb sejak 2009. Algoritma *Cuckoo Search* berdasarkan pada perilaku perkembangbiakan seperti cara hidup parasit dalam pengeraman telur burung *Cuckoo* [2] .

1.2. Rumusan Masalah

Tugas Akhir ini diharapkan menyelesaikan permasalahan yang terjadi pada *plant* dengan *Cuckoo Search Algorithm* yaitu penentuan kapasitas kompensasi optimal SVC yang akan diaplikasikan dalam sistem transmisi guna menyelesaikan masalah kompensasi daya reaktif.

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil Tugas Akhir dalam bentuk analisis dan simulasi.
2. Program MATPOWER digunakan dalam perhitungan nilai profil tegangan bus dan rugi daya dan analisis aliran daya.
3. Analisis dan simulasi dilakukan pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV.
4. Metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yaitu *Cuckoo Search Algorithm*.

1.4. Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada Tugas Akhir ini antara lain adalah menentukan data penempatan optimal SVC pada sistem dengan metode *Cuckoo Search Algorithm*. Sehingga dapat memperbaiki profil tegangan pada bus sistem dan mengurangi rugi daya pada saluran transmisi.

1.5. Metodologi

Pada Tugas Akhir ini dilakukan penelitian tentang penempatan optimal kompensator VAR dengan metode *Cuckoo Search Algorithm*. Perhitungan akan dilakukan dengan menggunakan aplikasi perhitungan berbasis matlab. Tahap pengerjaan Tugas Akhir ini adalah:

1.5.1 Studi Literatur

Studi literatur untuk mencari referensi bahan melalui buku, jurnal ilmiah (*paper*), dan *browsing* melalui internet yang berhubungan dengan judul Tugas Akhir ini. Referensi yang dicari mencakup teori prinsip kerja SVC dan cara penentuan optimalnya pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV melalui metode *Cuckoo Search Algorithm*.

1.5.2 Pengumpulan Data

Data yang bersangkutan seperti data pembangkitan sistem transmisi Jawa-Bali 500kV serta *single line diagram*-nya, dan data-data penunjang penggunaan metode *Cuckoo Search Algorithm*.

1.5.3 Simulasi Analisa Data

Melalui metode analisis aliran daya, dilakukan perhitungan rugi daya pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV. Setelah itu dilakukan proses simulasi dengan menambahkan SVC pada *plant* menggunakan metode *Cuckoo Search Algorithm* Sehingga didapatkan data aliran daya sistem yang baru. Setelah itu data aliran daya tersebut dibandingkan dengan data yang sebelumnya agar didapatkan kesimpulan.

1.5.4 Penulisan Buku

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab, dengan uraian sebagai berikut:

BAB 1 : PENDAHULUAN

Bagian ini membahas tentang dasar-dasar penyusunan Tugas Akhir yaitu melingkupi latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan batasan masalah, metodologi yang digunakan, sistematika dan relevansi laporan Tugas Akhir ini.

BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini meliputi teori penunjang yang menjadi acuan Tugas Akhir ini, yaitu teori kompensasi beban, prinsip kompensasi daya reaktif, dan *Static Var Compensator* (SVC).

BAB 3 : CUCKOO SEARCH ALGORITHM

Bagian ini berisi proses penjelasan mengenai bagaimana pemodelan simulasi penempatan optimal SVC dengan metode *Cuckoo Search Algorithm* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini.

BAB 4 : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

Bagian ini membahas mengenai hasil simulasi penempatan optimal SVC dengan metode *Cuckoo Search Algorithm* dan efeknya terhadap sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV.

BAB 5 : PENUTUP

Bagian ini meliputi kesimpulan yang diambil dari hasil simulasi dan analisa yang telah dilakukan. Selain itu juga dicantumkan saran agar dapat memberikan perbaikan dan penyempurnaan Tugas Akhir ini.

1.7. Relevansi

Hasil dari Tugas Akhir ini diharapkan mampu memberikan kontribusi berupa masukan terhadap sistem kelistrikan, khususnya dalam penentuan penempatan *Static Var Compensator* (SVC) pada sebuah jaringan tenaga listrik. Agar didapatkan hasil kompensasi yang optimal dalam sistem tersebut.

BAB 2

KOMPENSASI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

Sistem tenaga listrik modern direpresentasikan oleh sistem interkoneksi yang sangat tergantung pada sistem kontrol untuk memanfaatkan sumber daya yang ada secara optimal. Masalah utama yang dihadapi oleh sistem tenaga listrik modern adalah jatuhnya nilai tegangan atau ketidakstabilan tegangan setelah gangguan terjadi pada sistem daya. Ketidakstabilan *steady state* disebabkan oleh adanya ketidakstabilan sudut daya dan generator yang kehilangan sinkronisasinya secara perlahan. Selain itu turunnya profil tegangan bus beban di bawah kondisi batas yang diizinkan [3].

Disisi lain perluasan pembangkit tenaga listrik dan pembangunan saluran transmisi yang baru sangat terbatas. Namun permintaan listrik cenderung tetap bahkan meningkat. Maka sistem transmisi dan pembangkit seakan dipaksa untuk menyuplai beban yang jumlahnya cenderung meningkat. Hal ini menyebabkan rugi daya pada sistem menjadi lebih besar [4].

Permasalahan terkait perubahan profil tegangan pada sistem transmisi disebabkan berbagai gangguan pada sistem distribusi. Untuk mengatasi gangguan turunya profil tegangan (*voltage drop*) pada sistem transmisi, dipasang kompensasi berupa kapasitor bank (*fix capacitor*) dan *Flexible AC Transmission System (FACTS) Device*, salah satunya adalah *Static VAR Compensator (SVC)* [1].

2.1. Faktor Daya dan Kompensasi Daya Reaktif

Faktor daya (*power factor, pf*) didefinisikan sebagai rasio nyata P (Watt) terhadap daya semu S (VA). Faktor daya nilainya bervariasi antara 0 dan 1. Lagging untuk beban induktif dan leading untuk beban kapasitif. Faktor daya beban induktif dapat diperbesar dengan memberikan daya reaktif. Idealnya besar kompensasi daya reaktif adalah sebesar kebutuhan daya reaktif kapasitif, sehingga faktor daya sama dengan 1 [1].

Kapasitas kapasitor yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya beban induktif ke faktor daya yang diperlukan dapat dihitung dengan persamaan berikut [5].

$$Q_c = P \left(\sqrt{\frac{1}{P_{forig}^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{P_{fnew}^2} - 1} \right) \quad (2.1)$$

Q_c = kapasitas kapasitor [VAR]

P = daya nyata beban [Watt]

P_{forig} = faktor daya semula

P_{fnew} = faktor daya yang diperlukan

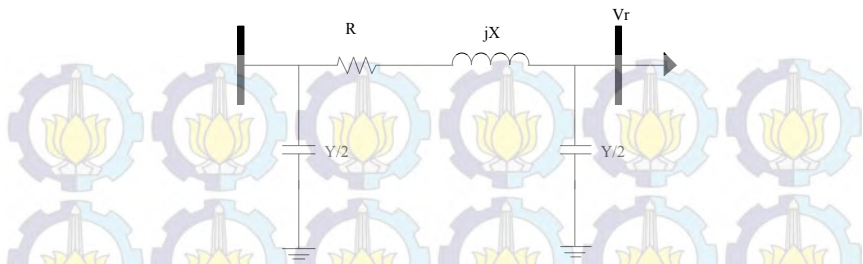
2.2. Kompensasi Beban

Kompensasi beban adalah sebuah usaha pengaturan daya reaktif guna meningkatkan kualitas daya dalam sistem tenaga listrik yang direpresentasikan dalam bentuk peningkatan profil tegangan dan *power factor* (pf). Cara pengaturan daya reaktif adalah dengan memasang peralatan kompensasi pada bus beban untuk mengatur aliran daya reaktif yang dibangkitkan dan digunakan pada bus tersebut. Bentuk kompensasi yang paling efektif adalah kompensasi paralel. Bentuk ini yang paling efektif dalam kemampuan transfer daya dari sistem dan stabilitas tegangan. Pengoperasian sistem mendekati *unity factor* sangat diharapkan [6].

2.2.1 Kompensasi Paralel

Kompensasi paralel adalah penempatan induktor pada sistem dari setiap saluran *line-to-neutral* untuk mengurangi sebagian atau keseluruhan suseptansi pada saluran tegangan tinggi. Hal tersebut menjadi sangat penting saat pembebanan rendah, dimana tegangan pada sisi penerima menjadi sangat tinggi. Kompensasi paralel sangat berguna untuk mengatasi fenomena tersebut [7].

Pada aplikasinya kompensasi paralel dari kapasitor paralel pasif digunakan untuk koreksi faktor daya (*pf*) dan meningkatkan profil tegangan. Pengaruh kompensasi shunt dapat ditunjukkan menggunakan teorema Thevenin dengan menjaga sudut fase beban pada nilai konstan. Tegangan Thevenin (V_{th}) dan impedansi (Z_{th}) dilihat dari akhir saluran pada gambar berikut.



Gambar 2.1 Rangkaian Nominal π Model Saluran Transmisi [8]

$$V_{th} = \left(\frac{Z_s}{Z_s + r + jX} \right) V_s \quad (2.2)$$

$$Z_{th} = \frac{Z_s (r + jX)}{Z_s (r + jX)} \quad (2.3)$$

$$Z_s = -j \frac{X_c X_{sh}}{X_c + X_{sh}} \quad (2.4)$$

$$X_{sh} = \frac{2}{|Y_{sh}|} \quad (2.5)$$

Dimana V_{th} adalah tegangan Thevenin, R adalah resistansi saluran transmisi, X adalah reaktansi saluran transmisi, X_c adalah reaktansi kapasitor paralel, Y_{sh} adalah admitansi kapasitor paralel, dan V_s adalah magnitude tegangan pengirim [8].

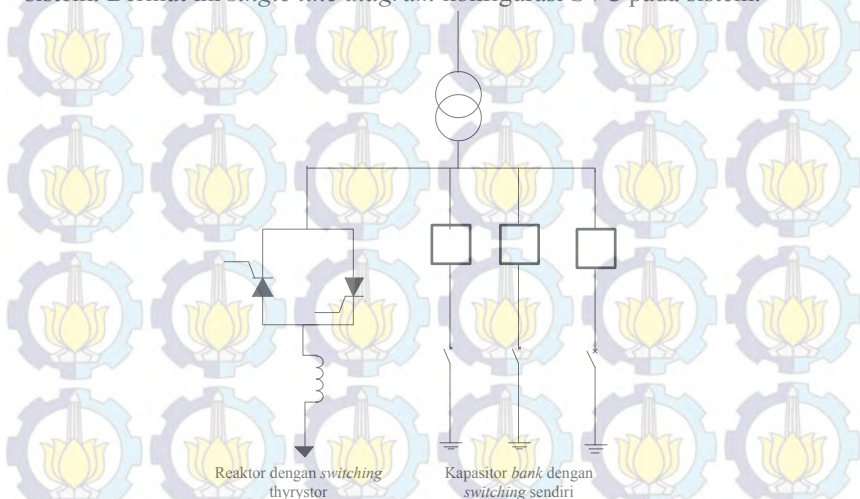
2.3. Static Var Compensator (SVC) [9]

Static VAR Compensator (SVC) adalah peralatan listrik untuk menyediakan kompensasi daya reaktif secara cepat pada jaringan transmisi listrik tegangan tinggi. SVC adalah bagian dari sistem peralatan transmisi AC yang fleksibel, berguna untuk pengatur tegangan dan menstabilkan sistem. Istilah “static” berdasarkan pada kenyataannya bahwa pada saat beroperasi atau melakukan perubahan kompensasi tidak ada bagian (*part*) SVC yang bergerak, karena proses komensasi sepenuhnya dikontrol oleh sistem elektronika daya.

Jika power sistem beban reaktif kapasitif (*leading*), SVC akan menaikkan daya reaktor untuk mengurangi VAR dari sistem sehingga tegangan sistem turun. Pada kondisi reaktif induktif(*lagging*), SVC

akan mengurangi daya reaktor untuk menaikkan VAR dari sistem sehingga tegangan sistem akan naik. Pada SVC pengaturan besarnya VAR dan tegangan dilakukan dengan mengatur besarnya kompensasi daya reaktif induktif pada reaktor, sedangkan kapasitor bank bersifat statis.

Prinsip kerja *Static VAR Compensator (SVC)* yaitu dengan cara mengatur sudut penyalan *thyristor*, sehingga dapat mengatur keluaran daya reaktif dari *SVC*. Nilai tegangan sistem merupakan input bagi pengendali, yang kemudian akan mengatur sudut penyalan *thyristor* [10]. Dengan demikian *Static VAR Compensator (SVC)* akan memberikan kompensasi daya reaktif yang sesuai dengan kebutuhan sistem. Berikut ini *single line diagram* konfigurasi SVC pada sistem.



Gambar 2. 2 *Single Line Diagram* Konfigurasi SVC [9]

SVC dapat dengan cepat memberikan *supply* daya reaktif yang diperlukan dari sistem sehingga besarnya tegangan pada gardu induk dapat dipertahankan sesuai dengan standar yang diizinkan. Kestabilan tegangan pada gardu induk akan meningkatkan kualitas tegangan yang sampai kekonsumen, mengurangi losses dan juga dapat meningkatkan kemampuan penghantar untuk mengalirkan arus.

SVC dapat digunakan untuk kompensasi yang bersifat induktif dan kapasitif. Pada kompensasi yang bersifat induktif, SVC menyerap kelebihan daya reaktif dari sistem sedangkan pada kompensasi yang

bersifat kapasitif, SVC menginjeksikan daya reaktif ke sistem. Pada analisa aliran daya, SVC dapat dimodelkan sebagai injeksi daya reaktif ideal pada bus i melalui persamaan:

$$\Delta Q_i = Q_{sve} \quad (2.6)$$

Secara lebih rinci fungsi SVC adalah:

1. Meningkatkan kapasitas sistem transmisi
2. Kontrol tegangan
3. Kontrol daya reaktif
4. Penurunan dan atau pembatasan frekuensi *over voltage* *power* disebabkan *load rejection*
5. Memperbaiki stabilitas jaringan AC
6. Mencegah terjadinya ketidakstabilan tegangan

Klasifikasi SVC berdasarkan kontrol yang digunakan dan pemasangannya pada sistem transmisi akan dijelaskan pada sub-bab berikut ini.

2.3.1. Bagian-Bagian SVC [9]

Secara umum Static VAR Compensator (SVC) terdiri dari beberapa bagian diantaranya adalah kontrol sudut penyalan, reaktor dan kapasitor. Berikut ini merupakan penjelasan dari bagian-bagian SVC.

2.3.1.1 Thyristor Valve Tower



Gambar 2.3 Thyristor Valve Tower [9]

Thyristor valve tower adalah bagian dari *Thyristor Controlled Reactor* (TCR) yang berguna sebagai pengatur sudut penyalan ketika tegangan transmisi berada pada besaran kontrolnya. Gambar dari *Thyristor Valve Tower* dapat dilihat pada gambar 2.3.

2.3.1.2 Reaktor



Gambar 2.4 Reaktor Pada Gardu Induk [9]

Aplikasi pemasangan reaktor dalam sistem tenaga listrik adalah untuk membentuk reaktansi induktif dengan tujuan tertentu. Beberapa tujuan tersebut diantaranya adalah untuk membatasi arus gangguan (*fault current limiting*), membatasi arus magnetisasi (*inrush current limiting*) pada motor dan kapasitor, menyaring harmonisa (*harmonic filtering*), mengkompensasi VAR (*VAR compensation*), mengurangi arus ripple (*reduction of ripple currents*), mencegah masuknya daya pembawa sinyal (*blocking of power line carrier*), pentanahan netral (*neutral grounding reactor*), peredam surja transien (*damping of switching transient*), pengurang flicker (*flicker reduction*) pada aplikasi tanur listrik, *circuit detuning*, penyeimbang beban (*load balancing*) dan *power conditioning*. Untuk mempermudah identifikasi, pada umumnya penamaan reaktor disesuaikan dengan tujuan pemasangannya atau lokasi dimana peralatan tersebut terpasang. Gambar reaktor pada gardu induk dapat dilihat pada gambar 2.4.

2.3.1.3 Kapasitor

Bank kapasitor (*capacitor banks*) adalah peralatan yang digunakan untuk memperbaiki kualitas energi listrik dengan memperbaiki mutu tegangan di sisi beban, memperbaiki faktor daya ($\cos \phi$) dan mengurangi rugi daya transmisi. Kekurangan dari pemakaian bank kapasitor adalah menimbulkan harmonisa pada proses *switching* dan memerlukan desain khusus PMT atau *switching controller*. Gambar 2.5 menunjukkan peletakan kapasitor pada gardu induk.



Gambar 2.5 Kapasitor Pada Gardu Induk [9]

2.3.1.4 Sistem Pendingin (Cooling System)



Gambar 2.6 Sistem Pendingin SVC Pada Gardu Induk [h]

Sistem pendingin dibutuhkan untuk memindahkan panas dari *thyristor* dan resistor pada rangkaian RC. Setiap *thyristor* mempunyai *drop* tegangan, oleh karena itu diperlukan pendingin untuk menghilangkan panas dalam jumlah besar. 95% panas yang dihasilkan dihilangkan oleh sistem pendingin, sisanya 5% menyebar ke udara. Proses kerja sistem pendingin yaitu air yang dingin dipompa menuju *valve tower* ketika terjadi panas tinggi. Dari *valve tower*, air panas mengalir ke *dry type heat exchanger* yang dipasang pada bagian atas *container*. Di *heat exchanger*, air akan menjadi dingin karena diberi aliran udara dengan cara dikipas. Setelah keluar dari *heat exchanger* air yang telah dingin tadi kembali ke pompa dan proses tersebut akan terjadi lagi. Gambar 2.6. menunjukkan sistem pendingin SVC di gardu induk.

2.3.2. Jenis SVC Berdasarkan Kontrol Yang Digunakan [9]

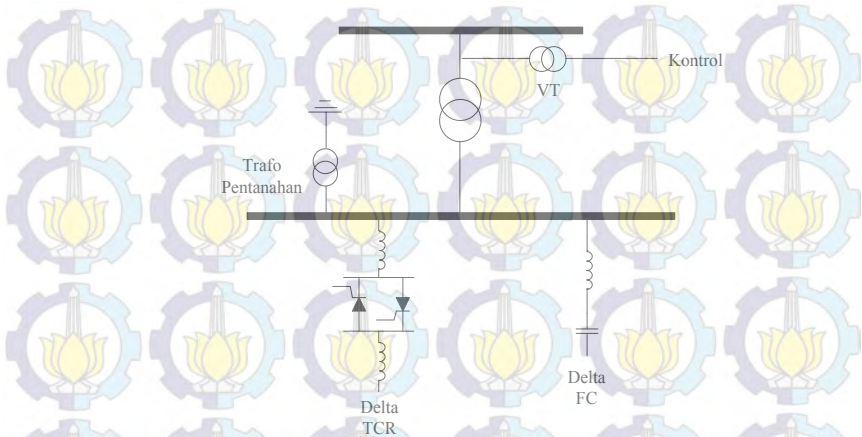
Tujuan pemasangan sebuah SVC dengan sebuah kontrol adalah agar hasil kompensasi SVC sesuai dengan yang diharapkan dan tidak menimbulkan gangguan pada sistem. Salah satu contohnya adalah pemasangan TSC untuk mengurangi harmonik yang ditimbulkan oleh reaktor. Berikut jenis-jenis SVC berdasarkan kontrol yang digunakan.

2.3.2.1 SVC dengan TCR dan Fixed Capacitor (FC)

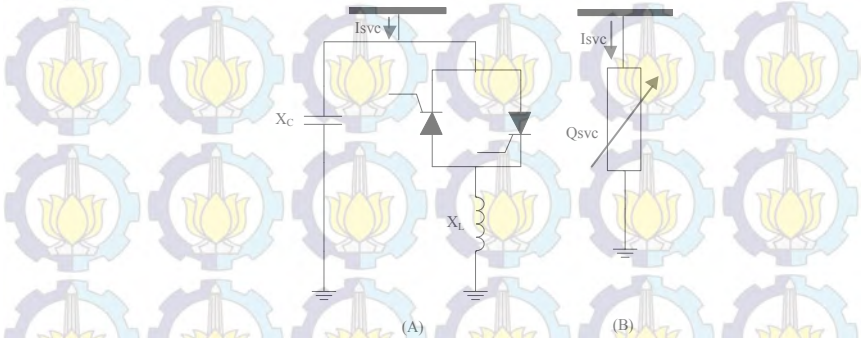
Fixed Capacitor bank terhubung ke dalam sistem melalui transformator *step down*. Rating reaktor dipilih lebih besar dari kapasitor, dengan jumlah yang diberikan maksimum daya reaktif (*lagging*) yang akan diserap dari sistem. Dengan mengubah sudut penyalan (*firing angle*) dari *thyristor* akan mengontrol sudut reaktor dari 90° menjadi 180° , maka sifat kompensasi akan berubah dari *lagging* ke *leading*. Kerugian dari konfigurasi ini adalah harmonik yang dihasilkan karena besarnya *partial conduction* dari reaktor dibawah kondisi operasi sinusoidal *steady-state* normal ketika SVC tidak menyerap daya reaktif MVAR.

Konfigurasi ini adalah yang paling populer untuk SVC. Dalam pemodelan SVC sebagai sumber daya reaktif yang dapat diubah kapasitasnya (*variable VAR sources*) seperti pada Gambar 2.8 (b), dapat kita tetapkan batas maksimum dan minimum pada keluaran daya reaktif (QSVC), masing-masing sesuai dengan suseptansi induktif (Bind) dan suseptansi kapasitif (Bcap) yang tersedia dan

tegangan referensi (V_{ref}) Batasan ini dapat ditulis sebagai berikut [10]
:



Gambar 2.7 SVC dengan TCR dan FC [9]



Gambar 2.8 Pemodelan SVC Total Susceptance Variable VAR
Source [10]

$$Q_{max} = B_{ind} \times (V_{ref})^2 \quad (2.7)$$

$$Q_{min} = B_{cap} \times (V_{ref})^2 \quad (2.8)$$

$$\text{Dimana : } B_{ind} = \frac{1}{X_L}, \quad B_{cap} = \frac{1}{X_C}$$

X_L = Reaktansi Induktif

X_C = Reaktansi Capasitif

Kemudian suseptansi (B) SVC dapat dinyatakan sebagai fungsi dari sudut penyalan α , ditunjukkan pada persamaan berikut ini:

$$B_{svc} = B_{cap} - B_{in}(\alpha) \quad (2.9)$$

Daya reaktif yang dihasilkan SVC dihitung melalui persamaan berikut ini :

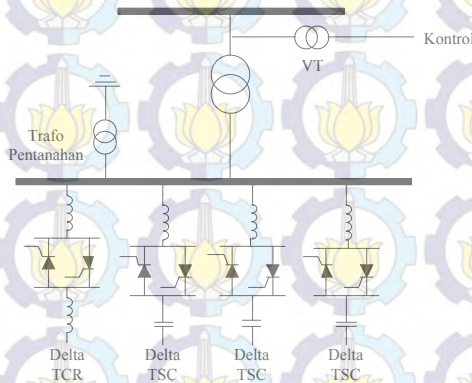
$$Q_{svc} = -V_I^2 \times B_{svc} \quad (2.10)$$

Dengan keseimbangan daya reaktif, tegangan (V_I) pada bus k berada pada jangkauan nilai yang mencakup nilai positif maupun negatif. Pada gambar 2.8 (b), arus yang dialirkan SVC adalah sebagai berikut [11]:

$$I_{svc} = jB_{svc} \cdot V_I \quad (2.11)$$

2.3.2.2 SVC dengan TCR dan Thyristor Switched Capacitor (TSC)

Kompensator jenis ini berguna untuk mengurangi losses pada kondisi beroperasi dan menjaga agar lebih baik saat gangguan sistem yang besar. TSC yang diparalel dengan SCV dan TCR berguna untuk mengurangi harmonik yang dihasilkan oleh reaktor. Gambar 2.9 menunjukkan konfigurasi SVC dengan TCR dan TSC.

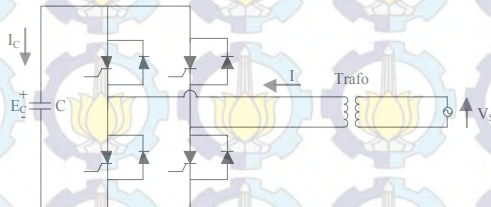


Gambar 2.9 SVC dengan TCR dan TSC [9]

2.3.2.3 SVC Menggunakan Forced Commutation Inverters

SVC ini terdiri dari satu inverter menggunakan *gare turn-off* (GTO) *thyristor*. Untuk inverter ini, sumber dc dapat berupa baterai atau kapasitor yang tegangan terminalnya dapat dinaikkan atau diturunkan oleh pengontrol inverter.

Inverter ini dihubungkan ke sumber sistem melalui reaktansi secara bergantian dan melalui keluaran trafo. Ketika tegangan inverter V_I sama dengan tegangan sistem, status SVC akan mengambang (*floating*). Ketika V_I lebih besar dari tegangan sistem, SVC akan bertindak sebagai kapasitor, dan jika V_I kurang dari tegangan sistem, SVC akan bertindak sebagai induktor. Dengan menggunakan beberapa inverter yang memiliki sudut fasa berbeda, operasi yang diinginkan dapat dicapai.



Gambar 2.10 SVC Yang Menggunakan *Self-Commutated Inverters* [9]

2.3.3 Jenis SVC Berdasarkan Pemasangan Pada Transmisi [9]

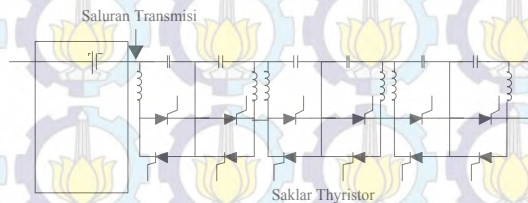
2.3.3.1 TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)

TCSR singkatan dari *Thyristor Controlled Series Reactor* yang dapat digunakan pada jaringan transmisi yang membutuhkan pengurangan beban dengan cepat dan pembatasan dari arus gangguan (*Current fault*). Alat ini dapat pula digunakan bersama TCSC pada jaringan transmisi yang memerlukan kompensasi induktif seri yang besar.

2.3.3.2 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) yang berfungsi sebagai pengendali impedansi dari jaringan transmisi. Seperti diketahui, impedansi sepanjang jaringan transmisi umumnya bersifat induktif sedangkan yang bersifat resistif hanya berkisar 5 hingga 10%. Ini berarti akan terasa sangat besar manfaatnya apabila kita mampu

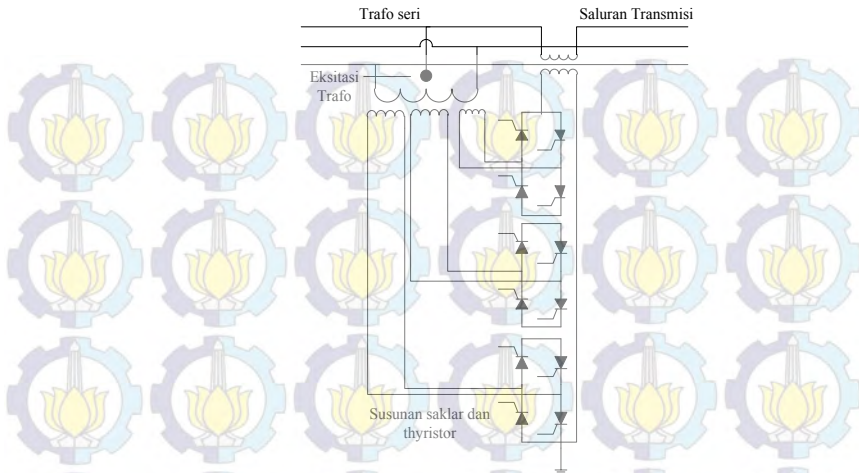
mengendalikan impedansi transmisi yang bersifat induktif pada kondisi stabil (*steady state impedance*). Hal ini dapat ditempuh dengan cara penambahan kapasitor dan induktor secara seri. Hubungan kapasitor secara seri ini akan berakibat pada pengurangan impedansi pada transmisi sedangkan penghubungan induktor secara seri akan berarti kenaikan impedansi pada transmisi yang sama. Studi kasus pemasangan TCSC yang telah dilaksanakan oleh *Electric Power Research Institute (EPRI)* pada satu jaringan transmisi menunjukkan bahwa TCSC berhasil meningkatkan kuantitas aliran daya (dalam MW) sebanyak 30% dengan sekaligus menjaga stabilitas jaringan transmisi tersebut. Gambar 2.33 menunjukkan skema dari TCSC.



Gambar 2.11 Gambar *Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)* [9]

2.3.3.3 TCPR (*Thyristor Controlled Phase Angle Regulator*)

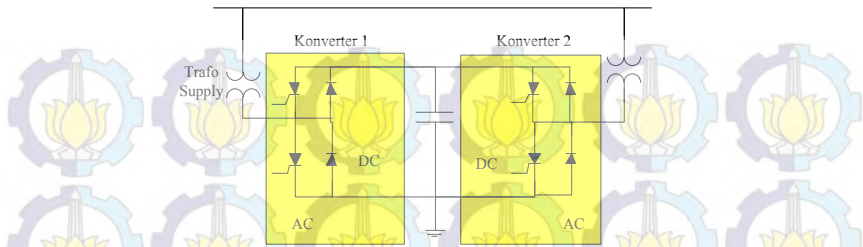
TCPR adalah singkatan dari *Thyristor Controlled Phase Angle Regulator*. Alat ini berfungsi sebagai pengendali selisih sudut fasa pada tegangan dari kedua ujung jaringan transmisi yang sama. Fungsi tersebut dimungkinkan dengan cara menyuntikan tegangan secara seri pada jaringan transmisi listrik. Penambahan sudut fasa α pada tegangan transmisi V dicapai dengan cara menambahkan tegangan Vq yang tegak lurus terhadap V . Tegangan Vq sendiri dihasilkan dari tegangan sekunder transformator yang dihubungkan dengan dua fasa dari sistem transmisi tiga fasa ini. Gambar 2.12 menunjukkan skema dari TCPR.



Gambar 2.12 Gambar *Thyristor Controlled Phase Angle Regulator* [9]

2.3.3.4 UPFC (Unified Power Flow Controller)

UPFC memiliki perancangan berbasis *inverter* dengan menggunakan *thyristor*. Sebagaimana diilustrasikan pada gambar 2.13 pada UPFC, vektor tegangan V_{pq} yang dihasilkan oleh inverter dimasukkan secara seri ke jaringan transmisi. Tegangan searah (dc) yang digunakan inverter ini didapatkan dari hasil penyearah (*rectification*) tegangan dari transmisi yang sama. UPFC merupakan alat kendali daya aktif dan daya reaktif secara terpisah pada transmisi listrik dan dapat dipasang pada ujung pengirim maupun penerima daya. UPFC juga merupakan alat pengendali daya yang sangat fleksibel karena dapat menggunakan salah satu atau kombinasi parameter dasar dari sistem aliran daya yaitu tegangan transmisi, impedansi transmisi, dan selisih sudut fasa transmisi. Hal ini merupakan sebuah keuntungan karena dengan pemasangan satu UPFC yang dapat mengendalikan ketiga parameter tersebut, maka tidak hanya sistem jaringan transmisi akan menjadi lebih baik, tetapi juga akan menjadi lebih murah dan mudah dalam pemeliharaan dan pengoperasiannya. Dengan kata lain, pemasangan satu UPFC akan sama halnya dengan pemasangan alat TCSC, STATCON dan TCPR secara bersamaan. Gambar 2.13 menunjukkan skema dari UPFC.



Gambar 2.13 Gambar *Unified Power Flow Controller* [9]

2.4. Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik dilakukan pada *node*(bus) dan saluran yang memiliki impedansi yang dinyatakan dalam satuan p.u. (per-unit). Dalam perhitungannya, terdapat beberapa parameter diantaranya daya aktif, daya reaktif, sudut tegangan dan magnitudo tegangan. Oleh sebab itu, bus dapat digolongkan menjadi tiga kategori :

1. Bus berayun (Swing/Slack Bus) yaitu bus yang terhubung dengan generator dan memiliki sudut fasa tegangan (referensi) dan magnitudo tegangan. Fungsi bus ini adalah mencatu kekurangan daya dan rugi daya pada jaringan.
2. Bus generator (Bus PV) yaitu bus yang terhubung dengan generator dan memiliki data daya aktif dan magnitudo tegangan yang telah diketahui.
3. Bus beban (Bus PQ) yaitu bus yang terhubung dengan beban. Pada bus ini terdapat data daya aktif dan reaktif beban yang telah diketahui [11].

Pada analisis aliran daya terdapat bus-bus yang menyusun suatu sistem tenaga listrik. Secara umum tiap bus dalam sistem tenaga listrik dengan n bus berlaku persamaan sebagai berikut :

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{k=1}^n V_k \cdot Y_{ik} \quad (2.12)$$

$$S_i = V_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik}^* \cdot V_k^* \quad (2.13)$$

Untuk $i, k = 1, 2, \dots, n$ [12]

2.5. Alogaritma Metaheuristik [14]

Kebanyakan algoritma konvensional atau algoritma klasik bersifat deterministik. Yaitu sesuatu yang pasti akan terjadi. Contohnya adalah metode simpleks dalam program linier. Beberapa algoritma deterministik menggunakan informasi gradien, atau dapat disebut algoritma berbasis gradien. Contohnya adalah algoritma *Newton-Rhapon*. Tetapi, jika ada beberapa keadaan yang terputus dalam fungsi objektif, algoritma tersebut akan tidak dapat bekerja dengan baik. Dalam kasus ini algoritma non-gradien lebih disukai. Algoritma berbasis Non-gradien tidak menggunakan proses derivatif, tetapi menggunakan nilai fungsi. Untuk algoritma stokastik, secara umum terdiri dari dua tipe yaitu heuristik dan metaheuristik walaupun perbedaan keduanya kecil. Heuristik berarti mencari atau menemukan dengan mencoba (*trial error*). Kualitas solusi untuk masalah optimasi yang sulit dapat ditemukan dalam waktu yang wajar, tetapi tidak menjamin solusi yang optimal tercapai. Diharapkan algoritma bekerja pada sebagian besar waktu, tetapi tidak semua waktu. Hal ini baik ketika kita tidak menginginkan solusi terbaik tetapi cukup baik untuk solusi yang mudah dicapai.

Pengembangan lebih lanjut dari algoritma heuristik adalah algoritma metaheuristik. *Meta* berarti di luar atau tingkat yang lebih tinggi umumnya lebih baik daripada heuristik sederhana. Selain itu, semua metaalgoritma heuristik menggunakan penawaran dalam pengacakan dan pencarian lokal. Namun, tren saat ini cenderung menamakan semua algoritma stokastik dengan pengacakan dan pencarian lokal sebagai metaheuristik. Pengacakan menyediakan cara terbaik baik untuk menggantikan pencarian lokal dengan pencarian pada skala global. Oleh karena itu, hampir semua algoritma metaheuristik cocok untuk optimasi global. Heuristik adalah sebuah metode dengan percobaan untuk menghasilkan solusi permasalahan kompleks dalam waktu eksekusi yang masuk akal.

Dua komponen penting dari setiap algoritma metaheuristik yaitu intensifikasi dan diversifikasi atau eksploitasi dan eksplorasi. Diversifikasi berarti menghasilkan solusi yang beragam sebanding dengan menjelajah ruang pencarian secara global. Intensifikasi berarti fokus pada pencarian dalam daerah lokal dengan mengeksplorasi informasi sehingga solusi terbaik ditemukan dalam daerah tersebut. Hal ini dikombinasikan dengan menyeleksi dari solusi terbaik. Seleksi terbaik menjamin bahwa solusi akan menuju optimal. Sementara itu

diversifikasi melalui pengacakan mencegah solusi terjebak pada hasil terbaik lokal dan dalam waktu yang sama meningkatkan keberagaman solusi. Kombinasi yang baik dari dua komponen utama tersebut akan menjamin bahwa optimalisasi global akan dicapai

Algoritma metaheuristik dapat diklasifikasikan dalam berbagai cara. Salah satu cara mengklasifikasikan mereka sebagai algoritma berbasis populasi dan algoritma berbasis lintasan. Contohnya algoritma genetika adalah berbasis populasi.

2.6. Tingkah Laku Perkembangbiakan Burung Kukuk (*Cuckoo*) [15]

Burung Kukuk (*Cuckoo*) merupakan jenis burung yang menarik, bukan hanya karena suaranya yang merdu tetapi karena strategi reproduksi mereka yang agresif. Gambar 2.14 menunjukkan bentuk fisik burung Kukuk. Beberapa spesies seperti burung Kukuk (*Cuckoo*) Ani dan Guira bertelur di sarang komunal (bersama) meskipun mereka dapat menghapus telur lain untuk meningkatkan kemungkinan penetasan telur mereka sendiri. Cukup banyak spesies burung Kukuk (*Cuckoo*) menggunakan pengeraman parasit obligat dengan cara meletakkan telur mereka ke dalam sarang burung tuan rumah. Terdapat tiga tipe dasar dari pengeraman parasit antara lain pengeraman parasit intraspesifik, pengeraman kooperasi, dan pengambil alihan sarang.

Beberapa burung tuan rumah dapat terlibat konflik langsung dengan burung Kukuk (*Cuckoo*) pengganggu. Jika burung tuan rumah mengetahui bahwa telur tersebut bukan miliknya, mereka akan melemparkan telur asing tersebut atau meninggalkan telur tersebut dan membangun sarang ditempat baru. Selain itu, waktu bertelur beberapa spesies burung kukuk *cuckoo* juga menakutkan. Burung Kukuk (*Cuckoo*) parasit seringkali memilih sarang dimana burung tuan rumah hanya meletakkan telurnya sendiri. Secara umum, telur burung Kukuk (*Cuckoo*) menetas sedikit lebih awal daripada telur burung tuan rumah. Setelah burung Kukuk (*Cuckoo*) pertama menetas, tindakan naluri pertama yang akan dilakukannya adalah mengusir telur burung tuan rumah dengan mendorong telur keluar dari sarang. Hal ini meningkatkan jumlah makanan yang telah disediakan oleh burung tuan rumah (*host*) bagi anak burung Kukuk (*Cuckoo*). Studi juga telah menunjukkan bahwa anak burung Kukuk (*Cuckoo*)

dapat menirukan suara anak burung tuan rumah (*host*) untuk meningkatkan kesempatan mendapatkan makanan.



Gambar 2. 14 Sepasang Burung Kukuk (*Cuckoo*) Jantan Dan Betina [16]

2.7. Algoritma Cuckoo Search [15]

Algoritma *Cuckoo Search* (CS) adalah salah satu algoritma metaheuristik yang dikembangkan pada tahun 2009 oleh Xin-She Yang dan Suash Deb. *Cuckoo Search* berdasarkan pada perkembangbiakan parasit dari sebagian spesies burung Kukuk (*Cuckoo*). Selain itu, algoritma ini ditingkatkan oleh apa yang disebut *Levy fight*, bukan oleh langkah acak (*random walk*) sederhana isotropik. Agar mudah dalam memahami *Cuckoo Search*, perhatikan tiga aturan berikut ini :

1. Setiap burung Kukuk (*Cuckoo*) meletakkan satu telur dalam satu waktu telurnya ke sarang yang telah dipilih secara acak
2. Sarang terbaik dengan kualitas telur terbaik akan terbawa ke generasi selanjutnya
3. Jumlah sarang burung tuan rumah yang tersedia bersifat tetap , probabilitas telur yang telah diletakkan oleh burung Kukuk (*Cuckoo*) dan ditemukan oleh burung tuan rumah dijabarkan dengan $p_a \in [0,1]$. Dalam kasus ini burung tuan rumah dapat membuang telur tersebut atau meninggalkan sarang dan membangun sarang di tempat yang baru.

Sebagai pendekatan lebih lanjut, asumsi pada poin nomor 3 dapat didekati dengan fraksi p_a dari sarang burung tuan rumah yang digantikan oleh sarang baru (menggunakan solusi random baru). Gambar 2.16 menunjukkan gambaran *Cuckoo Search Algorithm* secara sederhana.

Dalam masalah maksimisasi, kualitas atau kesesuaian dari solusi hanya dapat sebanding dengan nilai fungsi tujuan. Bentuk lain dari kesesuaian dapat didefinisikan dengan cara yang sama dengan fungsi *fitness* dalam algoritma genetika. Dalam pelaksanaan, kita dapat menggunakan representasi sederhana berikut bahwa setiap telur di sarang merupakan solusi, dan masing-masing burung Kukuk (*Cuckoo*) dapat meletakkan hanya satu telur (mewakili satu solusi), tujuannya adalah untuk menggunakan solusi yang baru dan lebih berpotensi (*Cuckoos*) untuk menggantikan solusi yang tidak begitu baik dalam sarang. Untuk saat ini, kita akan menggunakan pendekatan yang paling sederhana di mana setiap sarang hanya memiliki satu sel telur. Dalam hal ini, tidak ada perbedaan antara telur, sarang atau burung Kukuk (*cuckoo*), karena setiap sarang sesuai dengan satu telur yang juga menggambarkan satu burung Kukuk.

Berdasarkan tiga aturan tersebut langkah dasar dari *Cuckoo Search (CS)* dapat diringkas sebagai berikut :

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \alpha \oplus L'evy(\lambda), \quad (2.14)$$

Dimana $x_i^{(t+1)}$ adalah generasi solusi baru, i adalah burung kukuk ke- i . $\alpha > 0$ adalah ukuran langkah yang seharusnya berhubungan dengan skala kepentingan masalah tersebut. Dalam kebanyakan kasus dapat digunakan $\alpha = O(L/10)$, L adalah karakteristik skala kepentingan masalah.

Persamaan diatas merupakan persamaan stokastik untuk langkah acak (*random walk*). Secara umum, langkah acak (*random walk*) adalah rantai Markov yang status / lokasi berikutnya hanya tergantung pada lokasi saat ini dan probabilitas transisi . Lambang \oplus berarti perkalian *entrywise*. *Pseudocode* dari *Cuckoo Search Algorithm (CSA)* dapat dijabarkan sebagai berikut :

Objective function $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)^T$

Generate initial population of n host nests x_i

while ($t < \text{MaxGeneration}$) or (stop criterion)

Get a cuckoo randomly/generate a solution by Levy flights

And then evaluate its quality/fitness F_i

Choose a nest among n (say, j) randomly

if ($F_i > F_j$),

Replace j by the new solution

end

A fraction (p_a) of worse nests are abandoned

And new ones/solutions are built/generated

Keep best solutions (or nests with quality solutions)

Rank the solutions and find the current best

end while

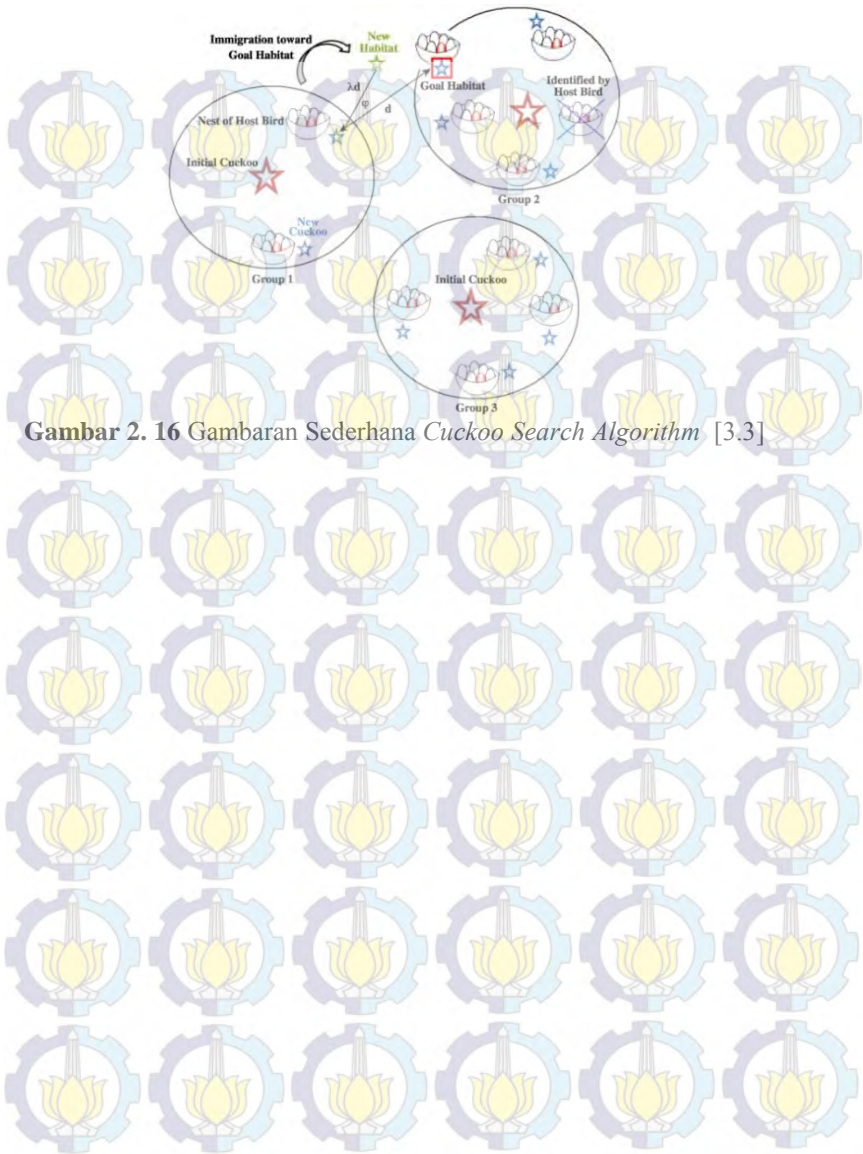
Postprocess results and visualization

Gambar 2. 15 Pseudocode Cuckoo Search Algorithm [15]

Levy flight pada dasarnya memberikan langkah acak (*random walk*) yang mana panjang langkah acaknya digambarkan dari distribusi *Levy* sebagai berikut :

$$L'_{\text{levy}} \sim u = t^{-\lambda}, \quad (1 < \lambda \leq 3), \quad (2.15)$$

Distribusi *Levy* memiliki varian yang tak terbatas dengan rata-rata yang tak terbatas. Langkah tersebut pada dasarnya membentuk sebuah proses langkah acak dengan distribusi *heavy tail*. Beberapa solusi baru harus dihasilkan oleh langkah *Levy* di sekitar solusi terbaik yang telah diperoleh, ini akan mempercepat pencarian lokal. Namun, sebagian besar solusi baru harus dihasilkan oleh pengacakan lapangan dan yang lokasi harus cukup jauh dari solusi terbaik saat ini, ini akan memastikan bahwa sistem tidak akan terjebak dalam optimum lokal.



Gambar 2. 16 Gambaran Sederhana *Cuckoo Search Algorithm* [3.3]

BAB 3

IMPLEMENTASI PENEMPATAN OPTIMAL STATIC VAR COMPENSATOR DENGAN METODE CUCKOO SEARCH ALGORITHM

Dalam Tugas Akhir ini, *Cuckoo Search Algorithm* digunakan untuk menyelesaikan permasalahan penempatan optimal *Static VAR Compensator*. Hal ini dilakukan untuk memperbaiki profil tegangan pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 KV . Berikut ini penjelasan mengenai implementasi *Cuckoo Search Algorithm* dalam penentuan optimal SVC sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV.

3.1. Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV

Data transmisi Jawa-Bali 500 kV yang digunakan didapat dari P3B pusat Jakarta pada September 2013. Data terdiri dari 25 bus, 30 saluran, dan 8 pusat pembangkit. Sistem ini memiliki nilai base tegangan sebesar 500 kV dan base daya sebesar 1000 MVA. Bus-bus pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

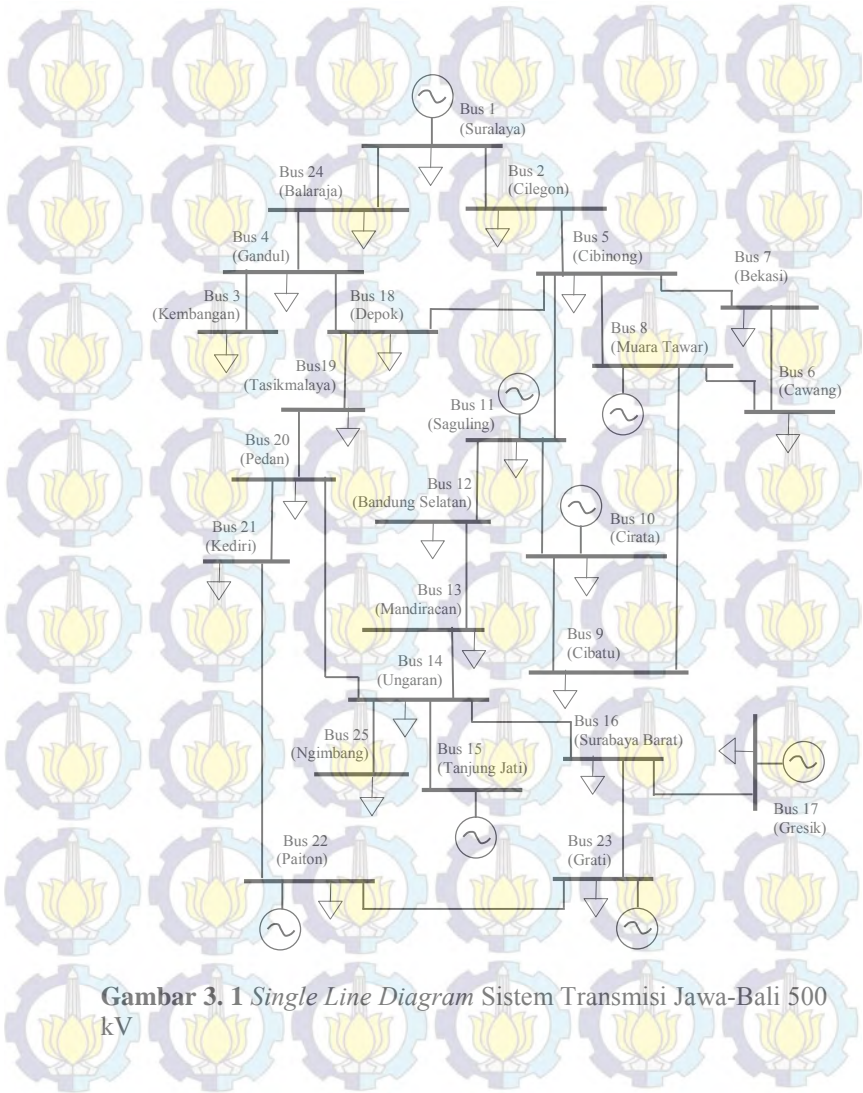
- a. Bus Swing : Suralaya.
- b. Bus Generator : Cirata, Muara Tawar, Saguling, Gresik, Tanjung Jati, Grati, dan Paiton.
- c. Bus Beban : Cilegon, Kembangan, Gandul, Cibingong, Cawang, Bekasi, Cibatu, Bandung Selatan, Mandiracan, Ungaran, Surabaya Barat, Depok, Tasikmalaya, Pedan, Kediri, Balaraja, Ngimbang.

Data pembebanan pada masing bus sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV dapat dilihat pada tabel 3.1. *Single Line Diagram (SLD)* sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV pada gambar 3.1. Data saluran transmisi Jawa-Bali 500 kV dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3. 1 Data Beban Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 Kv

No Bus	Nama Bus	Type Bus	Beban	
			P(MW)	Q(MVAR)
1	Suralaya	Slack	220	69
2	Cilegon	Load	186	243
3	Kembungan	Load	254	36
4	Gandul	Load	447	46
5	Cibinong	Load	680	358
6	Cawang	Load	566	164
7	Bekasi	Load	621	169
8	Muara Tawar	Generator	0	0
9	Cibatu	Load	994	379
10	Cirata	Generator	550	177
11	Saguling	Generator	0	0
12	Bandung Selatan	Load	666	400
13	Mandiracan	Load	293	27
14	Ungaran	Load	494	200
15	Tanjung Jati	Generator	0	0
16	Surabaya Barat	Load	440	379
17	Gresik	Generator	123	91
18	Depok	Load	327	67
19	Tasikmalaya	Load	213	73
20	Pedan	Load	530	180
21	Kediri	Load	551	153
22	Paiton	Generator	267	50
23	Grati	Generator	111	132
24	Balaraja	Load	681	226

25	Ngimbang	Load	279	59
----	----------	------	-----	----



Tabel 3. 2 Data Saluran Transmisi Jawa-Bali 500 kV

i-j	R(pu)	X(pu)	1/2 B	Tap Setting
1-2	0,000626496	0,007008768	0	1
1-24	0,003677677	0,035333317	0	1
2-5	0,013133324	0,146925792	0	1
3-4	0,001513179	0,016928308	0	1
4-18	0,000694176	0,006669298	0	1
5-7	0,004441880	0,042675400	0	1
5-8	0,006211600	0,059678000	0	1
5-11	0,004111380	0,045995040	0	1
6-7	0,001973648	0,018961840	0	1
6-8	0,005625600	0,054048000	0	1
8-9	0,002822059	0,027112954	0	1
9-10	0,002739960	0,026324191	0	1
10-11	0,001474728	0,014168458	0	1
11-12	0,001957800	0,021902400	0	1
12-13	0,006990980	0,067165900	0	1
13-14	0,013478000	0,129490000	0	1
14-15	0,013533920	0,151407360	0	1
14-16	0,015798560	0,151784800	0	1
14-20	0,009036120	0,086814600	0	1
16-17	0,001394680	0,013399400	0	1
16-23	0,003986382	0,044596656	0	1
18-5	0,000818994	0,007868488	0	1
18-19	0,014056000	0,157248000	0	1
20-21	0,015311000	0,171288000	0	1
21-22	0,010291000	0,115128000	0	1
21-22	0,010291000	0,115128000	0	1
22-23	0,004435823	0,049624661	0	1
24-4	0,002979224	0,028622920	0	1
25-14	0,023479613	0,225580588	0	1
25-16	0,005966652	0,057324466	0	1

3.2. Parameter Implementasi Algoritma CS

Implementasi algoritma *Cuckoo Search* dalam penempatan optimal SVC pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kv digambarkan melalui diagram alir (*flowchart*) sebagai berikut ini :



Gambar 3.2 Diagram Alir Penentuan Optimal SVC dengan *Cuckoo Search Algorithm*



Gambar 3.4 Diagram Alir Penentuan Optimal SVC dengan *Cuckoo Search Algorithm* (lanjutan)

Penjelasan mengenai masing-masing proses penting dalam flowchart penentuan optimal SVC dengan *Cuckoo Search Algorithm* akan dijabarkan dalam penjelasan berikut ini :

3.2.1 Inisiasi Parameter Algoritma Cuckoo Search

Pada tahap ini ditentukan parameter awal algoritma Cuckoo Search. Parameter tersebut antara lain jumlah sarang (n), probabilitas telur burung Cuckoo dibuang oleh burung inang (Pa) dan waktu sampling dalam proses iterasi awal ($time$). Selanjutnya dilakukan analisis aliran daya awal sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV sebelum kompensasi dilakukan.

3.2.2 Analisis Aliran Daya Sistem Transmisi Jawabali 500 kV

Pada tahap ini dihitung analisis aliran daya dari sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV untuk mendapatkan data profil tegangan pada tiap bus. Selain itu juga untuk menghitung nilai rugi daya sebelum diberikan kompensasi *Static Var Compensator (SVC)* pada sistem. Persamaan aliran daya yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + \sum_{i,i \neq j}^n \sum_j^n Y_{ij} V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.1)$$

$$Q_i = V_i^2 B_{ii} - \sum_{i,i \neq j}^n \sum_j^n Y_{ij} V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.2)$$

Tujuan dari analisis aliran daya tersebut adalah untuk mengetahui pada bus berapa terdapat tegangan dibawah standar sehingga dapat ditentukan berapa banyak SVC yang akan dipasang. Kemudian, jumlah SVC tersebut akan dimasukkan ke dalam batas atas (*upper bound*) dan batas bawah (*lower bound*) untuk digunakan mencari nilai solusinya [17].

Analisis aliran daya yang digunakan pada tugas akhir ini adalah analisis aliran daya dengan metode *Newton-Rhapson* yang terdapat pada satu paket program MATPOWER. MATPOWER adalah paket dari MATLAB® *M-files* yang digunakan untuk memecahkan masalah analisis aliran daya (*power flow*) dan analisis aliran daya optimal (*optimal power flow*). Hal ini dimaksudkan sebagai alat simulasi bagi peneliti agar mudah digunakan. MATPOWER dirancang untuk memberikan kinerja terbaik.

3.2.3 Inisiasi Parameter Algoritma *Cuckoo Search* [17]

Batasan solusi dan inisialisasi berdasarkan struktur solusi, posisi dari kandidat SVC tidak boleh melebihi dari banyaknya bus pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV.

Selain itu, pada algoritma *Cuckoo Search* sarang dipilih secara acak diantara batas atas dan batas bawah. Untuk kasus ini nilai pertama dari sarang yang juga mewakili posisi peletakan SVC adalah

bilangan bulat. Oleh karena itu, digunakan fungsi $round(x)$ untuk mengembalikan nilai x ke nilai bilangan bulat terdekat. Berikut ini merupakan persamaan yang menunjukkan inisialisasi ruang pencarian :

$$Nest_i = LowB + rand().(UpB - LowB) \quad (3.3)$$

$$Nest_i (1 : n) = round (Nest_i (1:n)) \quad (3.4)$$

Dimana $Nest_i$ adalah populasi sarang ke- i , UpB adalah batas atas, $LowB$ adalah batas bawah vektor.

$$UpB = \{x_{max}, x_{max}, \dots, x_{max}, Q_{max}, Q_{max}, \dots, Q_{max}\} \quad (3.5)$$

$$LowB = \{x_{min}, x_{min}, \dots, x_{min}, Q_{min}, Q_{min}, \dots, Q_{min}\} \quad (3.6)$$

Nilai x_{max} adalah nomor bus terbesar pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV. Sedangkan nilai x_{min} adalah nomor bus terkecil pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV. Q_{max} adalah nilai daya reaktif terbesar yang dibangkitkan oleh SVC. Q_{min} adalah nilai daya reaktif terkecil yang dibangkitkan oleh SVC. Untuk mencegah terjadinya duplikasi posisi yang sama, maka digunakan batasan SVC sebesar $x_1 < x_2 < \dots < x_n$.

3.2.4 Pembangkitan Telur Cuckoo Via Levy Flight [17]

Algoritma Cuckoo search terdiri dari dua proses acak yang terpisah. Salah satunya untuk membangkitkan telur burung kukuk (Cuckoo) dan yang lain untuk membuang telur asing burung kukuk (Cuckoo) dari sarang. Pada tahap pertama langkah acak di bangkitkan oleh persamaan *Levy flight*. Dari persamaan berikut ini *Levy flight* dibangkitkan :

$$step = \frac{u}{v^{\beta}} \quad (3.7)$$

$$u = rand().\sigma, v = rand() \quad (3.8)$$

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\Gamma(\frac{1+\beta}{2}) \beta 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right)^{\frac{1}{\beta}}; \beta = \frac{3}{2} \quad (3.9)$$

Dimana $\Gamma()$ adalah fungsi gamma.

Persamaan berikut ini menjelaskan proses burung kukuk (*Cuckoo*) meletakkan telurnya pada sarang.

$$newNest_i = Nest_i + rand\Delta X_i \quad (3.10)$$

$$\Delta X_i = step (Nest_{best} - Nest_i) \quad (3.11)$$

Dimana $step$ adalah langkah yang dibangkitkan oleh *Levy flight*, $Nest_{best}$ adalah solusi terbaik.

Pada tahapan pencarian telur asing, sarang baru dibangkitkan secara acak dari populasi. Terdapat probabilitas pa untuk mencari telur asing. Solusi yang baru dapat dicari melalui persamaan berikut :

$$newNest_i = Nest_i + K. \Delta X_i^{dis} \quad (3.12)$$

$$K = \begin{cases} 1, & \text{jika } rand() < P_a \\ 0, & \text{untuk yang lainnya} \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\Delta X_i^{dis} = rand() [randperm(Nest_i) - randperm(Nest_i)] \quad (3.14)$$

Dimana $randperm(Nest_i)$ adalah kekhawatiran acak untuk posisi sarang.

3.2.5 Evaluasi Nilai *Fitness* [17]

Fungsi *fitness* yang digunakan didasarkan pada empat hal yang akan dijadikan parameter (*multi-objective problem*) yaitu rugi daya aktif, deviasi tegangan, biaya investasi SVC, dan biaya pembangkitan generator. Selain itu diasumsikan bahwa parameter yang bersifat teknis yaitu rugi daya aktif dan deviasi tegangan lebih penting daripada parameter yang bersifat ekonomis seperti biaya investasi SVC. Karena itu diasumsikan nilai pembobotan antara rugi daya aktif, deviasi tegangan, dan biaya investasi SVC berturut-urut sebagai $\alpha = 0,3$, $\beta = 0,3$, $\eta = 0,2$, dan $C = 0,2$. Sehingga didapatkan fungsi *fitness* sebagai berikut :

$$FF = \alpha \frac{P_{loss}}{P_{loss,base}} + \beta \frac{\Delta V}{\Delta V_{base}} + \eta \frac{C_{svc}}{C_{max}} + C \frac{C_{genc}}{C_{maxgenc}} \quad (3.15)$$

Dimana :

- P_{loss} adalah rugi daya aktif
- ΔV adalah index deviasi tegangan
- C_{svc} adalah total biaya SVC
- $P_{loss, base}$ adalah total rugi daya pada sistem
- ΔV_{base} adalah total deviasi tegangan sistem
- C_{max} adalah biaya investasi maksimum
- C_{genc} adalah biaya pembangkitan
- $C_{maxgenc}$ adalah total biaya pembangkitan

Empat parameter tersebut merupakan parameter *multiobjectives*.

Empat parameter fungsi *fitness* tersebut antara lain adalah sebagai berikut ini :

3.2.5.1 Rugi Daya Aktif

Total rugi daya aktif pada system tenaga dapat dijabarkan melalui persamaan berikut :

$$P_{loss} = \sum_{l=1}^{br} R_l I_l^2 = \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] Y_{ij} \cos \varphi_{ij} \quad (3.16)$$

Dimana br dan b adalah urutan saluran dan bus, R_l adalah resistansi saluran ke- l , I_l adalah arus yang melalui saluran ke- l , V_i dan δ_i adalah magnitudo dan sudut tegangan pada bus ke- i , Y_{ij} dan φ_{ij} adalah magnitudo dan sudut admitansi saluran antara bus i dan bus j . Rugi daya yang dihitung dalam satuan Mega Watt (MW).

3.2.5.2 Deviasi Tegangan

Deviasi tegangan adalah total penjumlahan deviasi tegangan pada semua bus dalam sistem tenaga dari nilai referensinya. Berikut ini persamaan yang mendefinisikan deviasi tegangan :

$$\Delta V_{\Sigma} = \sum_{i=1}^b \left(\frac{V_{ref,i} - V_i}{V_{ref,i}} \right)^2 \quad (3.17)$$

Dimana $V_{ref,i}$ adalah tegangan referensi pada bus ke- i .

3.2.5.3 Biaya Investasi SVC [18]

Biaya investasi setiap SVC digambarkan sebagai fungsi kuadrat dari daya reaktif. Fungsi kuadrat tersebut dijabarkan sebagai berikut :

$$C_{svc} = \sum_{k=1}^n 0.3Q_k^2 - 305Q_k + 127380 \quad (3.18)$$

Dimana n adalah banyaknya SVC yang terpasang, Q_k adalah daya reaktif SVC ke- k .

3.2.5.4 Biaya Pembangkitan Generator

Biaya pembangkitan generator digambarkan sebagai fungsi kuadrat dari daya aktif. Fungsi kuadrat tersebut dijabarkan sebagai berikut :

$$C_{genc} = \sum_{k=1}^n aP_k^2 + bP_k + c \quad (3.19)$$

Dimana n adalah banyaknya bus generator, P_k adalah daya aktif bus generator ke- k . Besarnya nilai a , b , dan c berbeda setiap bus generator dan telah diinputkan pada data sistem.

3.2.6 Batasan Operasional [17]

Penempatan optimal dan pencarian kapasitas SVC harus memenuhi semua batasan operasional seperti batasan keseimbangan daya, batasan tegangan bus dan batasan saluran transmisi. Batasan operasional yang berupa batasan keseimbangan daya digambarkan sebagai persamaan berikut :

$$P_{G,i} - P_{D,i} = V_i \sum_{j=1}^b \left[V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \right] \quad (3.20)$$

$$Q_{G,i} - Q_{D,i} = V_i \sum_{j=1}^b \left[V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \right] \quad (3.21)$$

Keseimbangan dari pembangkitan daya dan permintaan daya harus memenuhi pada setiap titik. Dimana $P_{G,i}$ dan $Q_{G,i}$ adalah permintaan daya aktif dan permintaan daya reaktif. G_{ij} dan B_{ij} mewakili elemen real dan imajiner Y'_{ij} dari matriks admitansi. Setiap generator hanya bekerja pada batasan dari daya reaktif. Batasan tersebut bernilai sebesar :

$$Q_{i,min} \leq Q_i \leq Q_{i,max} \quad (3.22)$$

Dimana nilai $Q_{i,min}$ adalah nilai pembangkitan daya reaktif minimum pada bus generator di sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV. Nilai $Q_{i,max}$ adalah nilai pembangkitan daya reaktif maksimum pada bus generator di sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV. Untuk menjaga sistem tenaga beroperasi pada keadaan stabil dan menjaga kualitas dayanya, tegangan bus pada setiap bus harus diatur disekitar nilai nominal. Batasan tegangan tersebut bernilai sebesar :

$$V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max} \quad (3.23)$$

$V_{i,min}$ bernilai sebesar 0.95 p.u. dan $V_{i,max}$ bernilai sebesar 1.05 p.u.

BAB 4

ANALISA DAN SIMULASI DATA

Bab ini menampilkan hasil simulasi perhitungan Penempatan Optimal *Static Var Compensator (SVC)* pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV dengan metode *Cuckoo Search Algorithm*. Analisa yang dilakukan adalah melihat pengaruh penempatan SVC pada tegangan bus sistem dan rugi daya (losses) sistem setelah dan sebelum diberi kompensasi.

4.1 Aliran Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Sebelum Kompensasi

Analisis aliran daya sebelum kompensasi dilakukan dengan program MATPOWER 5.1 untuk mengetahui keadaan awal sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV sebelum dipasang kompensasi *Static Var Compensator (SVC)*. Hasil analisis aliran daya ini ditunjukkan pada tabel 4.1

Tabel 4. 1 Aliran Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Sebelum Kompensasi SVC

Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1,000	0,000	3063,93	846,97	220,00	69,00
2	0,997	-0,357	0,00	0,00	186,00	243,00
3	0,974	-6,250	0,00	0,00	254,00	36,00
4	0,975	-5,994	0,00	0,00	447,00	46,00
5	0,978	-6,595	0,00	0,00	680,00	358,00
6	0,978	-8,929	0,00	0,00	566,00	164,00
7	0,975	-8,687	0,00	0,00	621,00	169,00
8	1,000	-7,863	100,00	1010,55	994,00	379,00
9	0,993	-7,896	0,00	0,00	994,00	379,00
10	1,000	-6,478	700,00	429,92	550,00	177,00
11	1,000	-5,821	700,00	1293,91	0,00	0,00
12	0,981	-5,166	0,00	0,00	666,00	400,00
13	0,957	-0,446	0,00	0,00	293,00	27,00
14	0,946	11,436	0,00	0,00	494,00	200,00

Tabel 4. 1 Aliran Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV sebelum Kompensasi SVC (lanjutan)

Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
15	1,000	17,228	660,00	328,93	0,00	0,00
16	0,988	22,298	0,00	0,00	440,00	379,00
17	1,000	23,574	1839,00	619,45	123,00	-91,00
18	0,975	-6,208	0,00	0,00	327,00	67,00
19	0,936	-0,256	0,00	0,00	213,00	73,00
20	0,927	8,928	0,00	0,00	530,00	180,00
21	0,940	15,586	0,00	0,00	551,00	153,00
22	1,000	25,563	2180,00	525,31	267,00	50,00
23	1,000	24,268	440,00	328,47	111,00	132,00
24	0,980	-3,891	0,00	0,00	681,00	226,00
25	0,973	19,427	0,00	0,00	279,00	59,00
Total:			9682,93	5437,49	9493,00	3496,00

Dari hasil analisis aliran daya pada tabel 4.1 terlihat bahwa bus yang ditandai oleh warna merah memiliki profil tegangan dibawah standar yang diperbolehkan. Dari data tersebut terlihat bahwa bus 14,19,20,dan 21 memiliki profil tegangan dibawah 0,95 p.u.

Tabel 4. 2 Rugi Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Sebelum Kompensasi SVC

Branch #	From Bus	To Bus	From Bus injection		To Bus injection		Loss ($I^2 * Z$)	
	Bus	Bus	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	916,98	350,59	-916,37	-343,84	0,604	6,750
2	1	24	1926,96	427,38	-1912,63	-298,73	14,328	137,650
3	2	5	730,37	100,84	-723,19	-20,48	7,183	80,350
4	3	4	-254,00	-36,00	254,10	37,17	0,105	1,170
5	4	18	525,81	-64,77	-525,60	66,74	0,205	1,970
6	5	7	816,75	9,90	-813,65	19,85	3,096	29,750
7	5	8	322,66	-385,31	-321,02	401,06	1,639	15,750
8	5	11	-325,95	-430,49	327,20	444,50	1,253	14,010
9	6	7	-192,50	190,30	192,65	-188,85	0,151	1,450
10	6	8	-373,50	-354,30	375,06	369,27	1,558	14,970

Tabel 4.2 Rugi Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Sebelum Kompensasi SVC (lanjutan)

Branch #	From Bus	To Bus	From Bus injection		To Bus injection		Loss ($I^2 \cdot Z$)	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
11	8	9	45,96	240,21	-45,79	-238,59	0,169	1,620
12	9	10	-948,21	-140,41	950,76	164,92	2,551	24,510
13	10	11	-800,76	87,99	801,72	-78,80	0,957	9,190
14	11	12	-428,92	928,20	430,97	-905,30	2,047	22,900
15	12	13	-1096,97	505,30	1107,58	-403,41	10,606	101,890
16	13	14	-1400,58	376,41	1431,53	-79,05	30,951	297,360
17	14	15	-652,64	-246,59	660,00	328,93	7,360	82,330
18	14	16	-1164,15	-31,73	1188,09	261,72	23,938	229,990
19	14	20	459,79	170,52	-457,36	-147,20	2,428	23,320
20	16	17	-1711,19	-664,23	1716,00	710,45	4,811	46,220
21	16	23	-777,68	-175,96	780,28	204,99	2,595	29,030
22	18	5	770,96	-461,70	-770,26	468,38	0,695	6,680
23	18	19	-572,35	327,96	-578,79	-256,01	6,432	71,950
24	19	20	-791,79	183,01	803,34	-53,78	11,551	129,230
25	20	21	-875,97	20,98	885,17	81,89	9,196	102,870
26	21	22	-1436,17	-234,89	1460,81	510,58	24,643	275,690
27	22	23	452,19	-35,27	-451,28	45,48	0,913	10,210
28	24	4	1231,63	63,73	-1226,91	-18,40	4,717	45,320
29	25	14	577,01	94,66	-568,53	-13,15	8,483	81,500
30	25	16	-856,01	-153,66	860,78	199,47	4,769	45,820
Total							189,933	1941,49

Dari data rugi daya sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV sebelum kompensasi SVC pada tabel 4.2 yang didapatkan dari analisis aliran daya bahwa rugi daya sebesar 189,933 + j1941,49 MVA.

4.2 Simulasi Penggunaan *Cuckoo Search Algorithm* Dalam Proses Penentuan Letak dan Kapasitas Optimal SVC

Simulasi dilakukan pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV menggunakan *Cuckoo Search Algorithm*. Banyaknya SVC yang akan dipasang adalah sebanyak jumlah bus yang memiliki profil tegangan dibawah batas yang diperbolehkan, agar kapasitas SVC tidak melebihi atau dibawah kapasitas pembangkitan daya reaktif (VAR) yang telah ditentukan. Percobaan dibagi menjadi tiga kategori :

- a. Percobaan 1: Penempatan SVC dilakukan dengan populasi sarang, $n = 25$ dengan *sampling* = 5 sebanyak 10 kali percobaan.
- b. Percobaan 2 : Penempatan SVC dilakukan dengan populasi sarang, $n = 50$ dengan *sampling* = 5 sebanyak 10 kali percobaan.
- c. Percobaan 3 : Penempatan SVC dilakukan dengan populasi sarang, $n = 100$ dengan *sampling* = 5 sebanyak 10 kali percobaan.

Ketiga percobaan tersebut mempertimbangkan biaya investasi Static Var Compensator (SVC) dan biaya pembangkitan bus generator. Agar mendapatkan hasil penempatan SVC dan pengurangan rugi daya (losses) yang optimal, diperlukan batasan-batasan berikut ini pada sistem :

1. Nilai tegangan harus memenuhi batasan berikut ini :
 $V_{min} \leq V_i \leq V_{max}$ dengan $V_{min} = 0,95$ p.u., $V_{max} = 1,05$ p.u. dan i = nomor bus pada sistem.
2. Batas kapasitas operasional SVC, besarnya kompensasi SVC sebesar :
 $Q_{min} \leq Q_i \leq Q_{max}$ dengan $Q_{min} = 50$ MVAR , $Q_{max} = 800$ MVAR dan i = nomor bus yang dipasang SVC dalam sistem.
3. Fungsi Objektif yang digunakan mengacu pada 4 parameter yang dikontrol dari sistem, antara lain :
 - min P_{loss} , dengan P_{loss} adalah rugi daya aktif pada sistem (MW).
 - min ΔV , dengan ΔV adalah deviasi tegangan bus sistem terhadap tegangan acuan (*base*).
 - min C_{SVC} , dengan C_{SVC} adalah biaya investasi SVC yang akan dipasang pada sistem (\$).
 - Min C_{GEN} , dengan C_{GEN} adalah biaya pembangkitan daya pada sistem setelah SVC dipasang (Rp).

4.2.1 Hasil Percobaan 1

Pada percobaan 1, jumlah SVC yang akan dipasang pada sistem transmisi Jawa-Bali sebanyak jumlah bus yang mengalami tegangan dibawah batas yang diperbolehkan.

- a. Jumlah sarang (n) = 25
- b. Sampling = 5
- c. Iterasi = 250

Setelah simulasi dijalankan didapatkan letak dan kapasitas injeksi SVC pada sistem transmisi Jawa-Bali sebagai berikut :

- a. Posisi SVC 1 : bus 4 sebesar 140 MVAR

- b. Posisi SVC 2 : bus 14 sebesar 569 MVAR
- c. Posisi SVC 3 : bus 20 sebesar 694 MVAR
- d. Posisi SVC 4 : bus 19 sebesar 130 MVAR

Berikut ini data aliran daya setelah sistem transmisi Jawa-Bali dipasang kompensasi tersebut:

Tabel 4. 3 Hasil Aliran Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Simulasi dengan $n = 25$

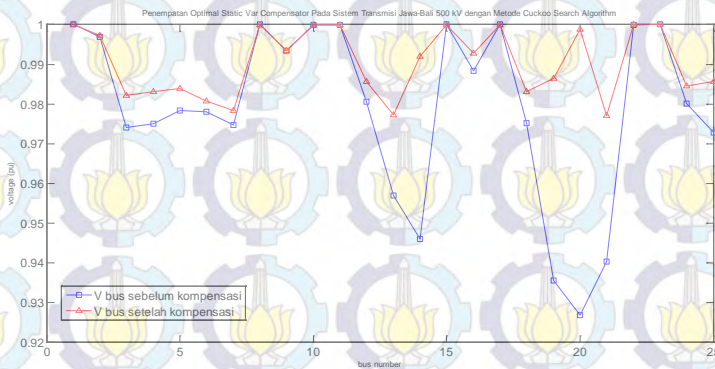
Bus	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	1	0	3047,16	684,7	220	69
2	0,997	-0,356	0	0	186	243
3	0,982	-6,208	0	0	254	36
4	0,983	-5,956	0	140	447	46
5	0,984	-6,537	0	0	680	358
6	0,981	-8,843	0	0	566	164
7	0,978	-8,605	0	0	621	169
8	1	-7,774	100	867,45		
9	0,993	-7,816	0	0	994	379
10	1	-6,405	700	429,62	550	177
11	1	-5,755	700	939,05		
12	0,986	-5,146	0	0	666	400
13	0,977	-0,695	0	0	293	27
14	0,992	10,108	0	569	494	200
15	1	15,869	660	27,03		
16	0,993	20,605	0	0	440	379
17	1	21,901	1839	292,46	123	-91
18	0,983	-6,162	0	0	327	67
19	0,986	-0,533	0	130	213	73
20	0,999	7,693	0	694	530	180
21	0,977	13,923	0	0	551	153
22	1	23,809	2180	208,37	267	50
23	1	22,554	440	283,49	111	132
24	0,985	-3,877	0	0	681	226
25	0,986	17,752	0	0	279	59
Total			9666,16	5265,17	9493	3496

Sedangkan total rugi daya setelah penempatan SVC ditunjukkan pada tabel 4.4 dibawah ini

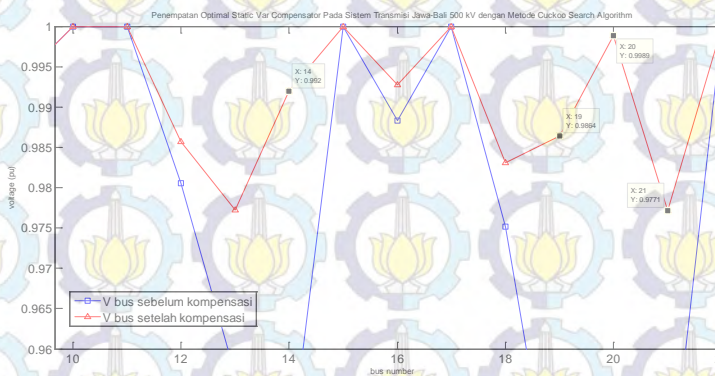
Tabel 4.4 Rugi Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Simulasi dengan $n = 25$

No. Saluran	Saluran		Rugi Daya	
	Dari	Ke	Aktif(MW)	Reaktif(MVAR)
1	1	2	0,582	6,51
2	1	24	13,831	132,88
3	2	5	6,994	78,25
4	3	4	0,103	1,15
5	4	18	0,192	1,84
6	5	7	3,097	29,76
7	5	8	1,238	11,9
8	5	11	0,854	9,55
9	6	7	0,121	1,16
10	6	8	1,356	13,03
11	8	9	0,17	1,63
12	9	10	2,521	24,22
13	10	11	0,943	9,06
14	11	12	1,282	14,35
15	12	13	9,017	86,63
16	13	14	27,497	264,17
17	14	15	5,905	66,06
18	14	16	22,358	214,8
19	14	20	2,145	20,61
20	16	17	4,312	41,43
21	16	23	2,389	26,73
22	18	5	0,552	5,3
23	18	19	5,281	59,08
24	19	20	10,576	118,32
25	20	21	9,242	103,4
26	21	22	22,757	254,59
27	22	23	0,858	9,6
28	24	4	4,591	44,11
29	25	14	7,951	76,38
30	25	16	4,443	42,69
TOTAL RUGIDAYA			173,157	1769,17

Hasil menunjukkan bahwa setelah SVC dipasang pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV nilai rugi daya aktif berkurang sebesar 16,776 MW, dari sebelumnya sebesar 189,933 MW menjadi 173,157 MW. Selain itu didapatkan biaya total investasi SVC yang dipasang pada sistem adalah \$ 294.520 USD. Dan didapatkan pula biaya pembangkitan pada sistem sebesar Rp 7.693.500.000 (MW/hour).



Gambar 4.1 Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Simulasi Pemasangan SVC dengan $n = 25$



Gambar 4.2 Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Simulasi Pemasangan SVC dengan $n = 25$ Pada Bus Kritis

4.2.2 Hasil Percobaan 2

Pada percobaan 2, jumlah SVC yang akan dipasang pada sistem transmisi Jawa-Bali sebanyak jumlah bus yang mengalami tegangan dibawah batas yang diperbolehkan.

- Jumlah sarang (n) = 50
- Sampling = 5
- Iterasi = 500

Setelah simulasi dijalankan didapatkan letak dan kapasitas injeksi SVC pada sistem transmisi Jawa-Bali sebagai berikut :

- Posisi SVC 1 : bus 20 sebesar 624 MVAR
- Posisi SVC 2 : bus 2 sebesar 776 MVAR
- Posisi SVC 3 : bus 21 sebesar 161 MVAR
- Posisi SVC 4 : bus 19 sebesar 763 MVAR

Berikut ini data aliran daya setelah sistem transmisi Jawa-Bali dipasang kompensasi tersebut :

Tabel 4.5 Hasil Aliran Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Simulasi dengan $n = 50$

Bus	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	1,000	0,000	3050,07	-124,17	220,00	69,00
2	1,003	-0,383	0,00	776,00	186,00	243,00
3	0,985	-6,202	0,00	0,00	254,00	36,00
4	0,986	-5,951	0,00	140,00	447,00	46,00
5	0,987	-6,541	0,00	0,00	680,00	358,00
6	0,982	-8,839	0,00	0,00	566,00	164,00
7	0,980	-8,600	0,00	0,00	621,00	169,00
8	1,000	-7,776	100,00	784,26		
9	0,993	-7,835	0,00	0,00	994,00	379,00
10	1,000	-6,443	700,00	429,11	550,00	177,00
11	1,000	-5,799	700,00	937,52		
12	0,984	-5,221	0,00	0,00	666,00	400,00
13	0,971	-0,832	0,00	0,00	293,00	27,00
14	0,976	10,026	0,00	0,00	494,00	200,00
15	1,000	15,797	660,00	130,50		

Tabel 4.5 Hasil Aliran Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Simulasi dengan n = 50 (lanjutan)

Bus	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
16	0,991	20,494	0,00	0,00	440,00	379,00
17	1,000	21,783	1839,00	400,77	123,00	-91,00
18	0,987	-6,162	0,00	0,00	327,00	67,00
19	1,042	-0,863	0,00	763,00	213,00	73,00
20	1,006	7,399	0,00	624,00	530,00	180,00
21	0,990	13,615	0,00	161,00	551,00	153,00
22	1,000	23,580	2180,00	101,12	267,00	50,00
23	1,000	22,384	440,00	314,87	111,00	132,00
24	0,986	-3,877	0,00	0,00	681,00	226,00
25	0,981	17,665	0,00	0,00	279,00	59,00
Total			9666,07	5297,97	9493,00	3496,00

Sedangkan total rugi daya setelah penempatan SVC ditunjukkan pada tabel 4.6 dibawah ini

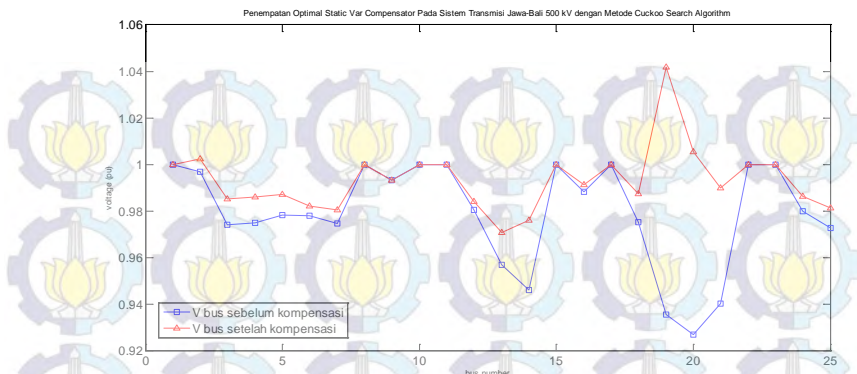
Tabel 4.6 Rugi Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Simulasi dengan n = 50

No. Saluran	Saluran		Rugi Daya	
	Dari	Ke	Aktif(MW)	Reaktif(MVAR)
1	1	2	0,651	7,28
2	1	24	13,707	131,69
3	2	5	7,036	78,72
4	3	4	0,103	1,15
5	4	18	0,226	2,17
6	5	7	3,126	30,03
7	5	8	1,077	10,35
8	5	11	0,637	7,13
9	6	7	0,109	1,05
10	6	8	1,241	11,93

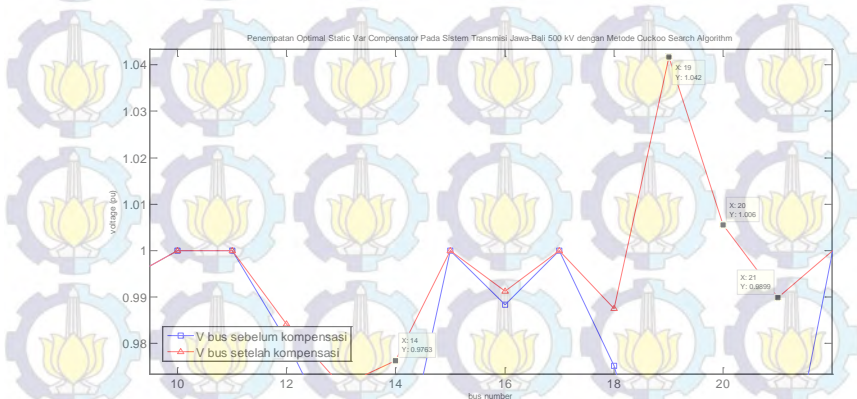
Tabel 4.6 Rugi Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Simulasi dengan n = 50 (lanjutan)

No. Saluran	Saluran		Rugi Daya	
	Dari	Ke	Aktif(MW)	Reaktif(MVAR)
11	8	9	0,171	1,65
12	9	10	2,466	23,69
13	10	11	0,918	8,82
14	11	12	1,423	15,92
15	12	13	8,858	85,11
16	13	14	27,011	259,50
17	14	15	6,126	68,53
18	14	16	22,005	211,41
19	14	20	3,463	33,28
20	16	17	4,444	42,70
21	16	23	2,297	25,70
22	18	5	0,557	5,35
23	18	19	6,619	74,04
24	19	20	11,935	133,52
25	20	21	9,204	102,97
26	21	22	23,084	258,25
27	22	23	0,779	8,71
28	24	4	4,585	44,05
29	25	14	7,775	74,70
30	25	16	4,433	42,59
TOTAL RUGIDAYA			176,066	1801,97

Hasil menunjukkan bahwa setelah SVC dipasang pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV nilai rugi daya aktif berkurang sebesar 13,867 MW, dari sebelumnya sebesar 189,933 MW menjadi 176,066 MW. Selain itu didapatkan biaya total investasi SVC yang dipasang pada sistem adalah \$ 280.590 USD. Dan didapatkan pula biaya pembangkitan pada sistem sebesar Rp 7.694.600.000 (MW/hour).



Gambar 4.3 Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Simulasi Pemasangan SVC dengan $n = 50$



Gambar 4.4 Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Simulasi Pemasangan SVC dengan $n = 50$ Pada Bus Kritis

4.2.3 Hasil Percobaan 3

Pada percobaan 3, jumlah SVC yang akan dipasang pada sistem transmisi Jawa-Bali sebanyak jumlah bus yang mengalami tegangan dibawah batas yang diperbolehkan.

- Jumlah sarang (n) = 100
- Sampling = 5
- Iterasi = 1000

Setelah simulasi dijalankan didapatkan letak dan kapasitas injeksi SVC pada sistem transmisi Jawa-Bali sebagai berikut :

- Posisi SVC 1 : bus 20 sebesar 666 MVAR
- Posisi SVC 2 : bus 4 sebesar 152 MVAR
- Posisi SVC 3 : bus 23 sebesar 644 MVAR
- Posisi SVC 4 : bus 14 sebesar 586 MVAR

Berikut ini data aliran daya setelah sistem transmisi Jawa-Bali dipasang kompensasi tersebut :

Tabel 4. 7 Hasil Aliran Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Simulasi dengan $n = 100$

Bus	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	1,000	0,000	3048,17	710,55	220,00	69,00
2	0,997	-0,356	0,00	0,00	186,00	243,00
3	0,981	-6,211	0,00	0,00	254,00	36,00
4	0,982	-5,959	0,00	152,00	447,00	46,00
5	0,983	-6,540	0,00	0,00	680,00	358,00
6	0,980	-8,849	0,00	0,00	566,00	164,00
7	0,978	-8,611	0,00	0,00	621,00	169,00
8	1,000	-7,780	100,00	893,46		
9	0,993	-7,818	0,00	0,00	994,00	379,00
10	1,000	-6,406	700,00	429,73	550,00	177,00
11	1,000	-5,752	700,00	971,69		
12	0,985	-5,133	0,00	0,00	666,00	400,00
13	0,976	-0,648	0,00	0,00	293,00	27,00
14	0,990	10,241	0,00	586,00	494,00	200,00
15	1,000	16,003	660,00	38,58		
16	0,993	20,765	0,00	0,00	440,00	379,00
17	1,000	22,060	1839,00	305,32	123,00	-91,00
18	0,982	-6,164	0,00	0,00	327,00	67,00
19	0,972	-0,436	0,00	0,00	213,00	73,00
20	0,993	7,852	0,00	666,00	530,00	180,00
21	0,974	14,103	0,00	0,00	551,00	153,00
22	1,000	23,985	2180,00	234,54	267,00	50,00

Tabel 4. 7 Hasil Aliran Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Simulasi dengan n = 100 (lanjutan)

Bus	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
23	1,000	22,721	440,00	287,51	111,00	132,00
24	0,984	-3,878	0,00	0,00	681,00	226,00
25	0,985	17,909	0,00	0,00	279,00	59,00
Total			9667,17	5275,38	9493	3496

Sedangkan total rugi daya setelah penempatan SVC ditunjukkan pada tabel 4.8 dibawah ini.

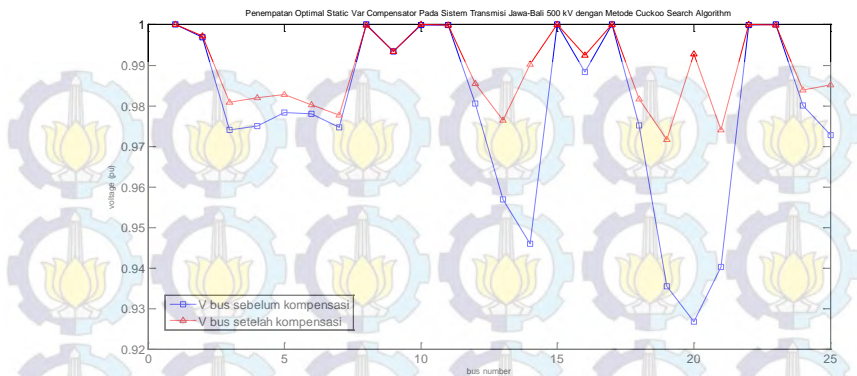
Tabel 4. 8 Rugi Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Simulasi dengan n = 100

No. Saluran	Saluran		Rugi Daya	
	Dari	Ke	Aktif(MW)	Reaktif(MVAR)
1	1	2	0,585	6,55
2	1	24	13,887	133,42
3	2	5	7,010	78,42
4	3	4	0,103	1,16
5	4	18	0,192	1,84
6	5	7	3,093	29,71
7	5	8	1,300	12,49
8	5	11	0,924	10,34
9	6	7	0,125	1,20
10	6	8	1,392	13,38
11	8	9	0,169	1,63
12	9	10	2,532	24,33
13	10	11	0,948	9,11
14	11	12	1,323	14,80
15	12	13	9,161	88,01
16	13	14	27,838	267,46
17	14	15	5,916	66,18
18	14	16	22,343	215,54

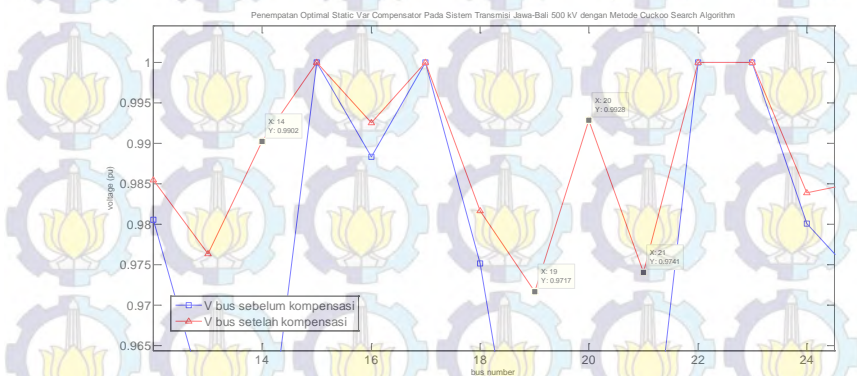
Tabel 4. 8 Rugi Daya Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Simulasi dengan $n = 100$ (lanjutan)

No. Saluran	Saluran		Rugi Daya	
	Dari	Ke	Aktif(MW)	Reaktif(MVAR)
19	14	20	2,035	19,55
20	16	17	4,326	41,56
21	16	23	2,410	26,96
22	18	5	0,563	5,41
23	18	19	5,428	60,72
24	19	20	10,664	119,30
25	20	21	9,128	102,12
26	21	22	22,779	254,83
27	22	23	0,870	9,73
28	24	4	4,598	44,17
29	25	14	7,976	76,63
30	25	16	4,460	42,85
TOTAL RUGI DAYA			174,168	1779,38

Hasil menunjukkan bahwa setelah SVC dipasang pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV nilai rugi daya aktif berkurang sebesar 15,765 MW, dari sebelumnya sebesar 189,933 MW menjadi 174,168 MW. Selain itu didapatkan biaya total investasi SVC yang dipasang pada sistem adalah \$ 252.320 USD. Dan didapatkan pula biaya pembangkitan pada sistem sebesar Rp 7.693.800.000 (MW/hour).



Gambar 4.5 Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Simulasi Pemasangan SVC dengan $n = 100$



Gambar 4.6 Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Simulasi Pemasangan SVC dengan $n = 100$ Pada Bus Kritis

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan percobaan yang dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada simulasi pertama dengan jumlah sarang (n) = 25, sampling = 5, dan iterasi = 250 didapatkan letak penempatan optimal SVC pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV pada bus 4 sebesar 140 MVAR, bus 14 sebesar 569 MVAR, bus 20 sebesar 694 MVAR, bus 19 sebesar 130 MVAR. Penempatan SVC pada bus-bus tersebut mampu menurunkan rugi daya sebesar 16,776 MW dan memperbaiki profil tegangan pada bus 14, 19, 20, 21 yang sebelumnya berada pada nilai yang tidak diizinkan menjadi 0,992 pu, 0,986 pu, 0,999 pu, dan 0,977 pu.
2. Selanjutnya pada simulasi kedua dengan jumlah sarang (n) = 50, sampling = 5, dan iterasi = 500 diperoleh letak penempatan optimal SVC pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV pada bus 20 sebesar 624 MVAR, bus 2 sebesar 776 MVAR, bus 21 sebesar 161 MVAR, bus 19 sebesar 763 MVAR. Penempatan SVC pada bus-bus tersebut mampu menurunkan rugi daya sebesar 13,867 MW dan memperbaiki profil tegangan pada bus 14, 19, 20, 21 yang sebelumnya berada pada nilai yang tidak diizinkan menjadi 0,976 pu, 1,042 pu, 1,006 pu, dan 0,990 pu.
3. Pada simulasi ketiga dengan jumlah sarang (n) = 100, sampling = 5, dan iterasi = 1000 didapatkan posisi penempatan optimal SC pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV pada bus bus 20 sebesar 666 MVAR, bus 4 sebesar 152 MVAR, bus 23 sebesar 644 MVAR, bus 14 sebesar 586 MVAR. Penempatan SVC pada bus-bus tersebut mampu menurunkan rugi daya sebesar 15,765 MW dan memperbaiki profil tegangan pada bus 14, 19, 20, 21 yang sebelumnya berada pada nilai yang tidak diizinkan menjadi 0,990 pu, 0,972 pu, 0,993 pu, dan 0,974 pu .

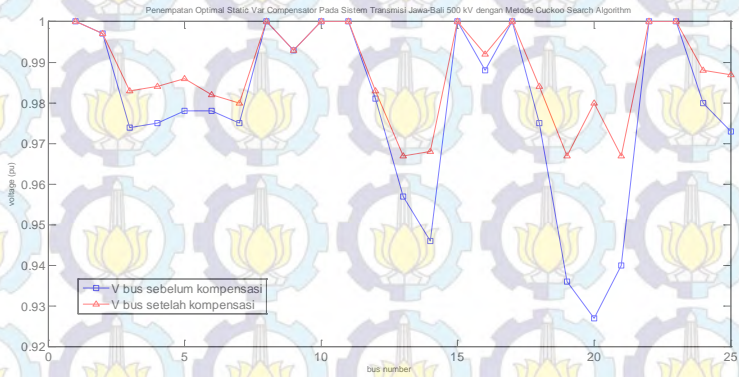
5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian dan pengembangan selanjutnya yang berkaitan dengan Tugas Akhir ini, yaitu:

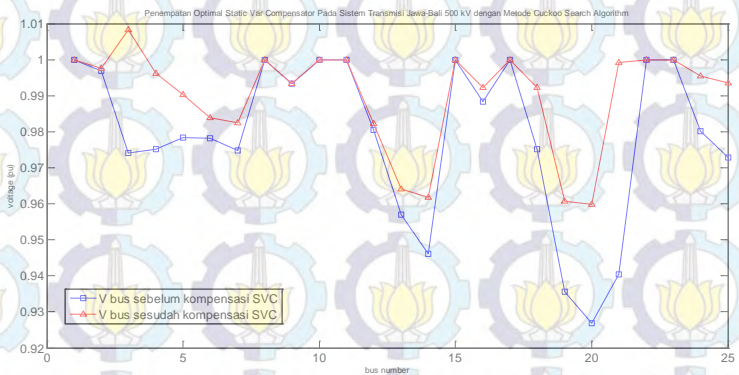
1. Simulasi penentuan optimal SVC menggunakan metode *Modified Cuckoo Search Algorithm* sehingga waktu yang dibutuhkan dalam simulasi lebih cepat.
2. Simulasi penentuan optimal SVC menggunakan fungsi objektif yang berbeda, sehingga dapat dibandingkan hasil .

LAMPIRAN

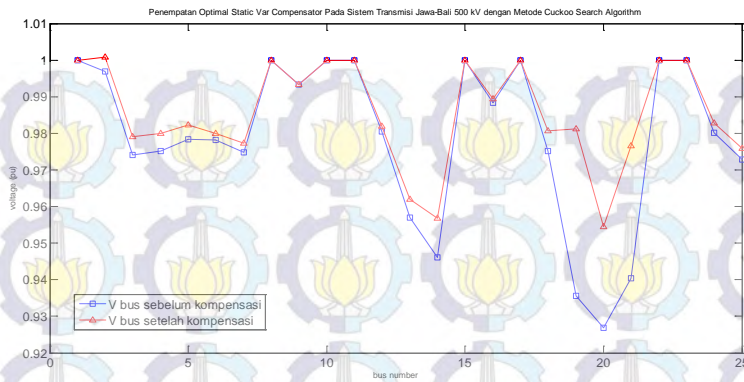
A. Hasil Simulasi Jumlah Sarang (n) = 25



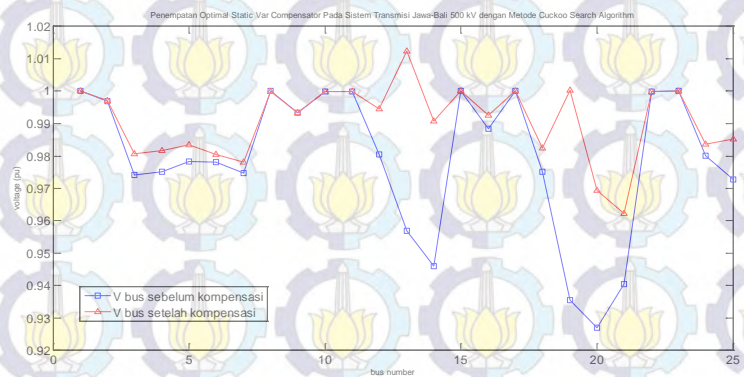
Gambar A.1 Grafik Hasil Running Ke-1 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25



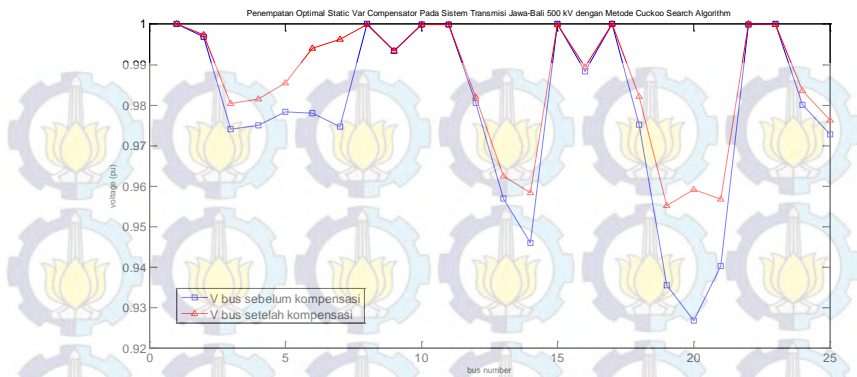
Gambar A.2 Grafik Hasil Running Ke-2 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25



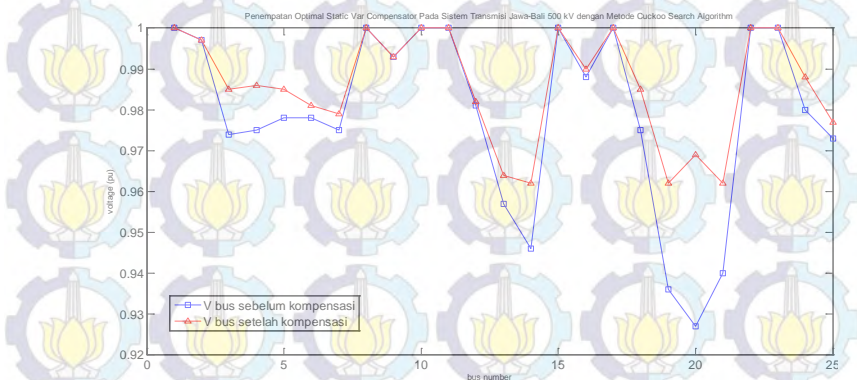
Gambar A.3 Grafik Hasil Running Ke-3 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25



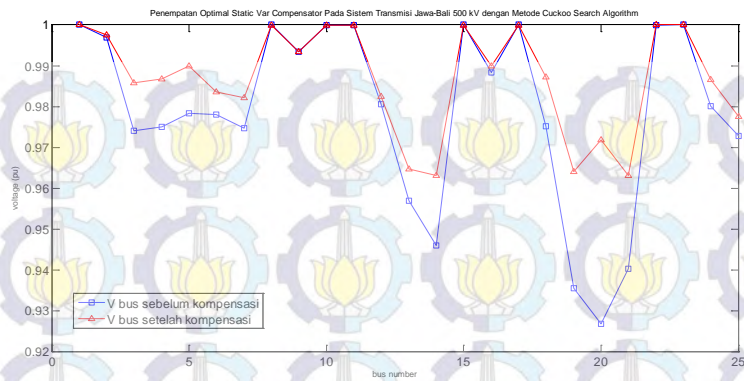
Gambar A.4 Grafik Hasil Running Ke-4 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25



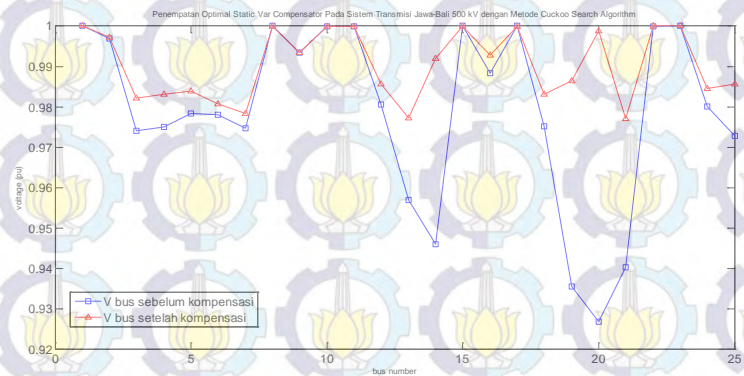
Gambar A.5 Grafik Hasil Running Ke-5 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25



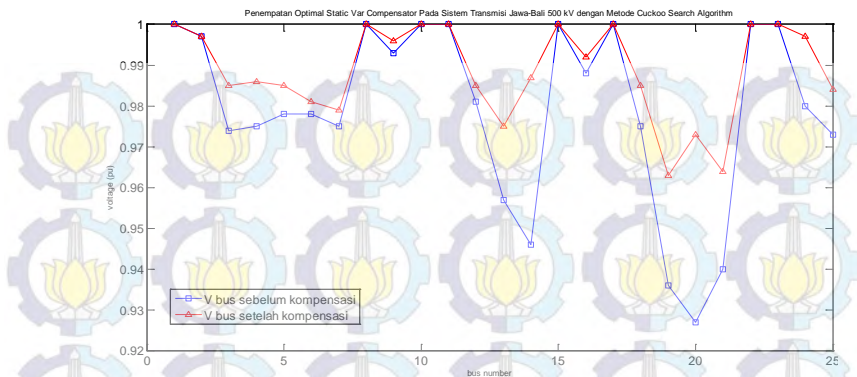
Gambar A.6 Grafik Hasil Running Ke-6 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25



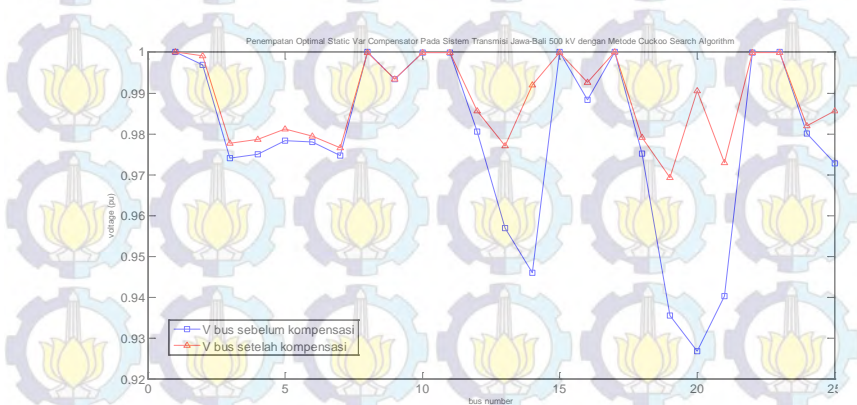
Gambar A.7 Grafik Hasil Running Ke-7 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25



Gambar A.8 Grafik Hasil Running Ke-8 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25

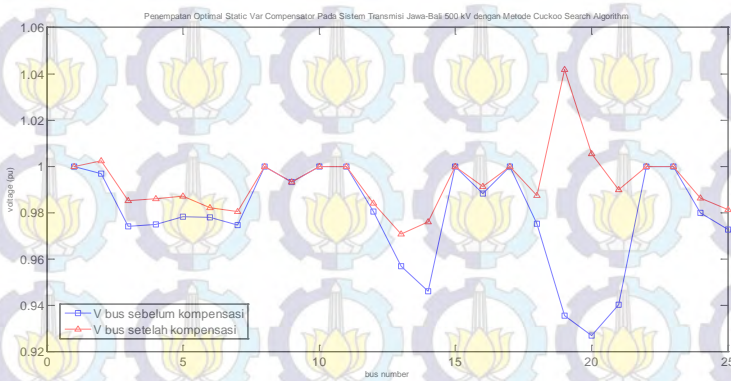


Gambar A.9 Grafik Hasil Running Ke-9 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25

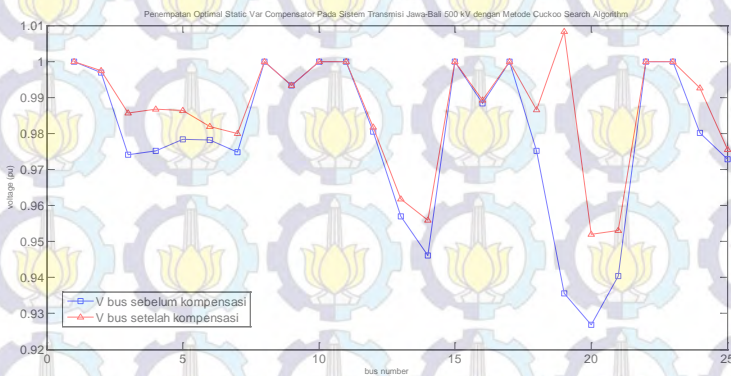


Gambar A.10 Grafik Hasil Running Ke-10 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 25

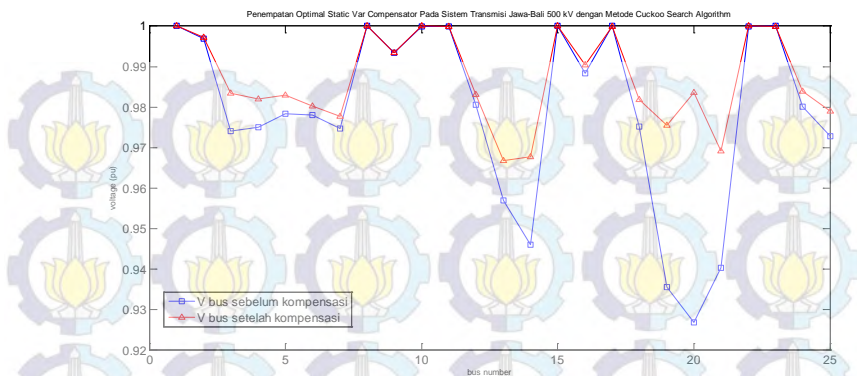
B. Hasil Simulasi Jumlah Sarang (n) = 50



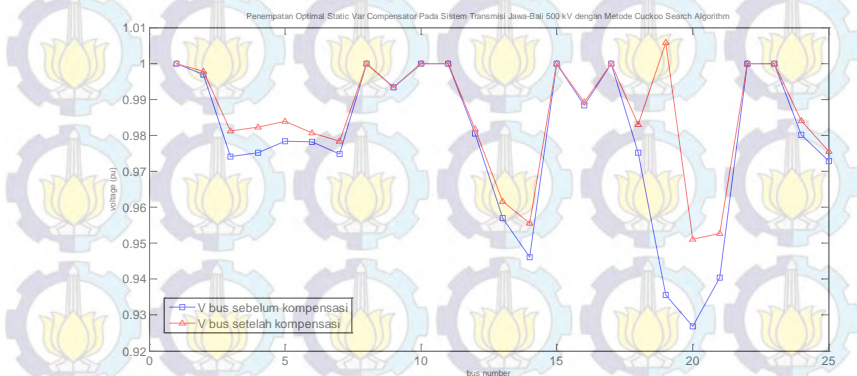
Gambar B.1 Grafik Hasil Running Ke-1 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50



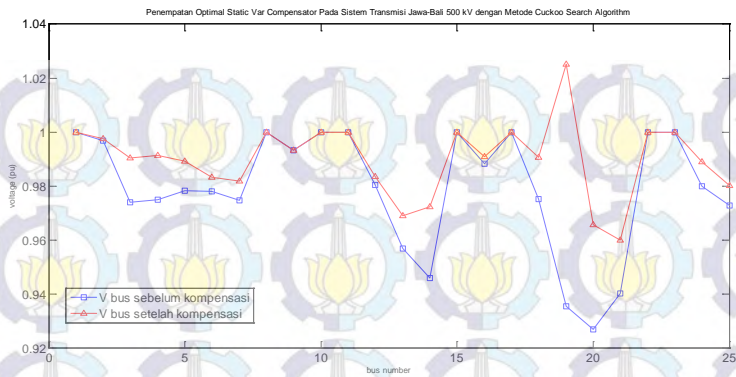
Gambar B.2 Grafik Hasil Running Ke-2 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50



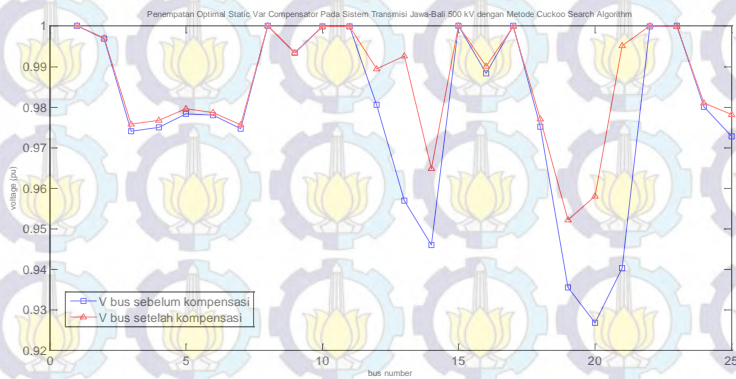
Gambar B.3 Grafik Hasil Running Ke-3 Profil Tegangan Simulasi SVC $n = 50$



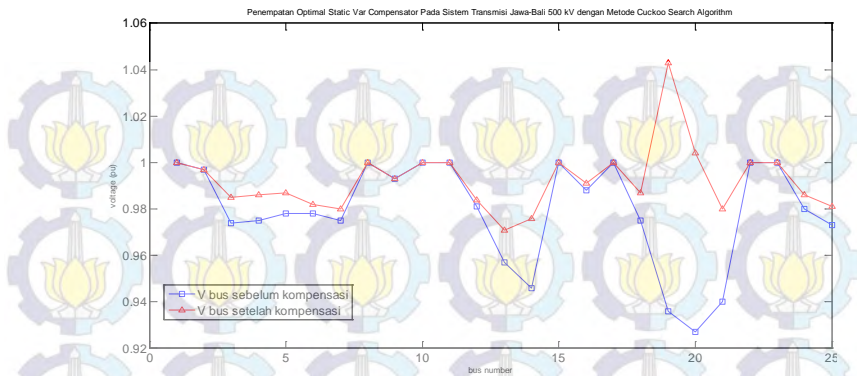
Gambar B.4 Grafik Hasil Running Ke-4 Profil Tegangan Simulasi SVC $n = 50$



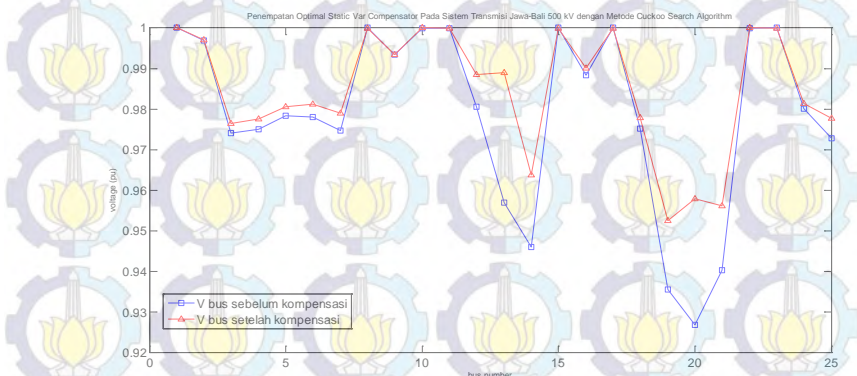
Gambar B.5 Grafik Hasil Running Ke-5 Profil Tegangan Simulasi SVC $n = 50$



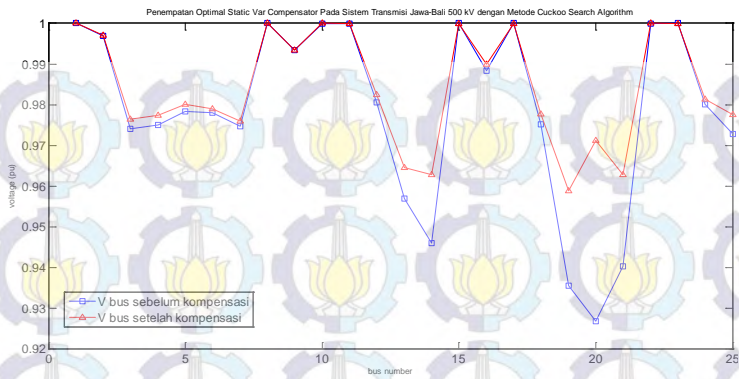
Gambar B.6 Grafik Hasil Running Ke-6 Profil Tegangan Simulasi SVC $n = 50$



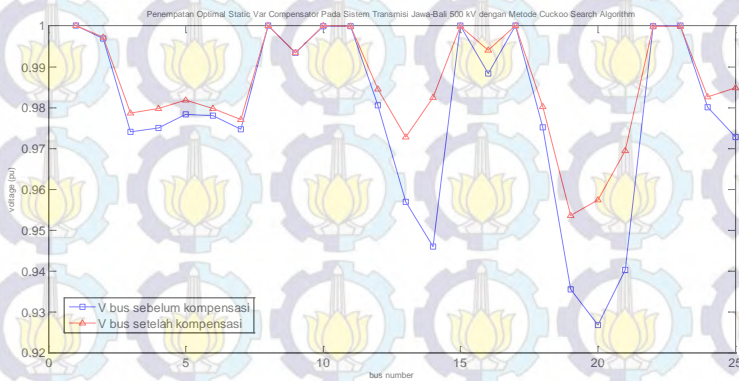
Gambar B.7 Grafik Hasil Running Ke-7 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50



Gambar B.8 Grafik Hasil Running Ke-8 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50

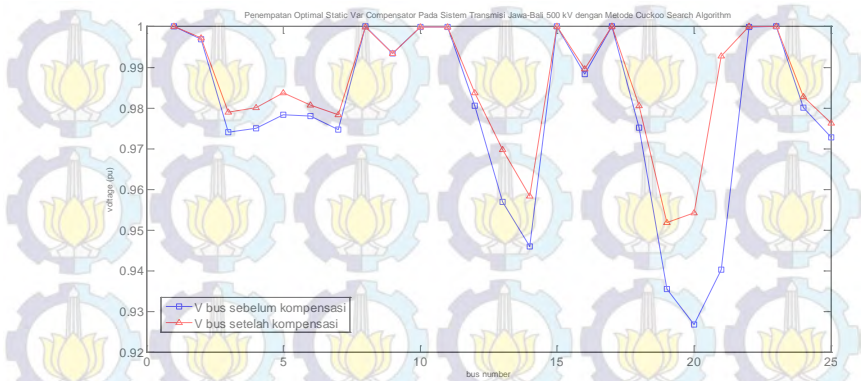


Gambar B.9 Grafik Hasil Running Ke-9 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50

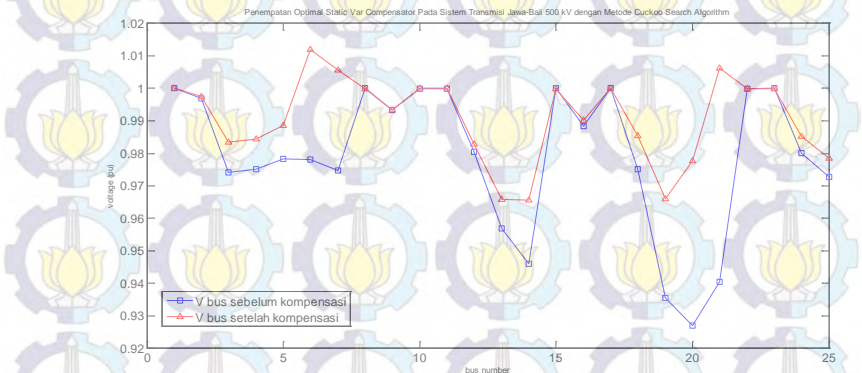


Gambar B.10 Grafik Hasil Running Ke-10 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 50

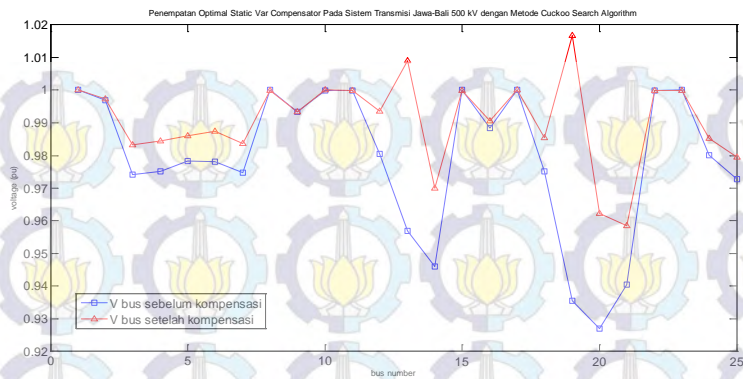
C. Hasil Simulasi Jumlah Sarang (n) = 100



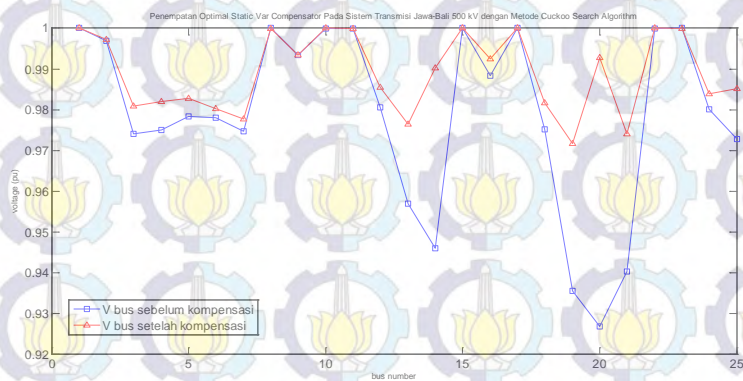
Gambar C.1 Grafik Hasil Running Ke-1 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100



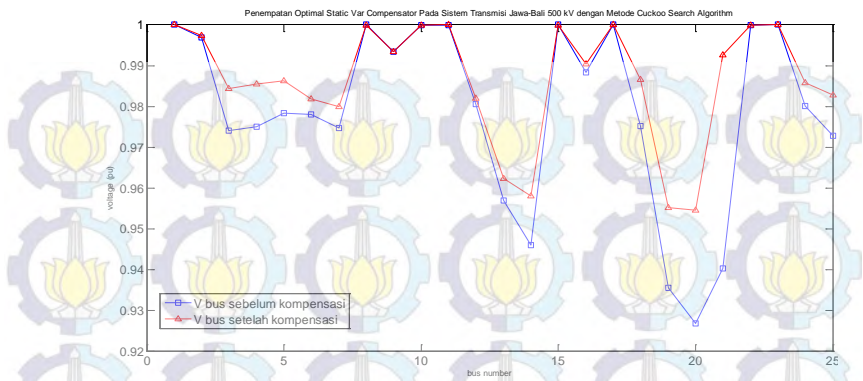
Gambar C.2 Grafik Hasil Running Ke-2 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100



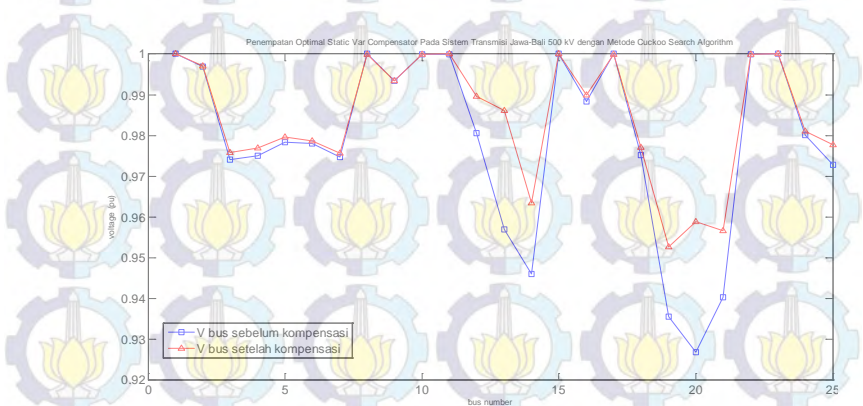
Gambar C.3 Grafik Hasil Running Ke-3 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100



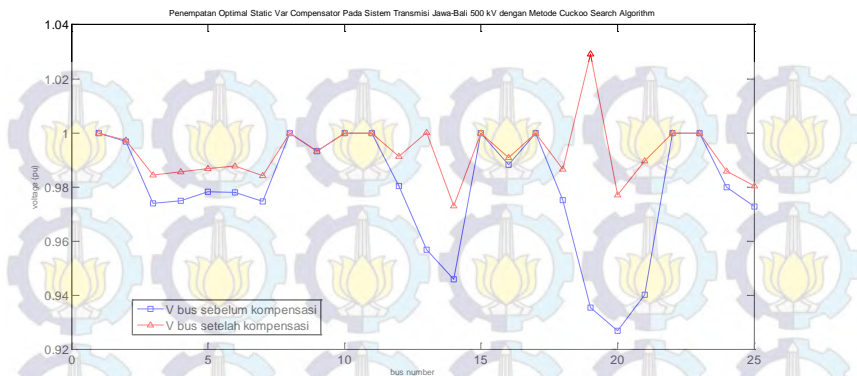
Gambar C.4 Grafik Hasil Running Ke-4 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100



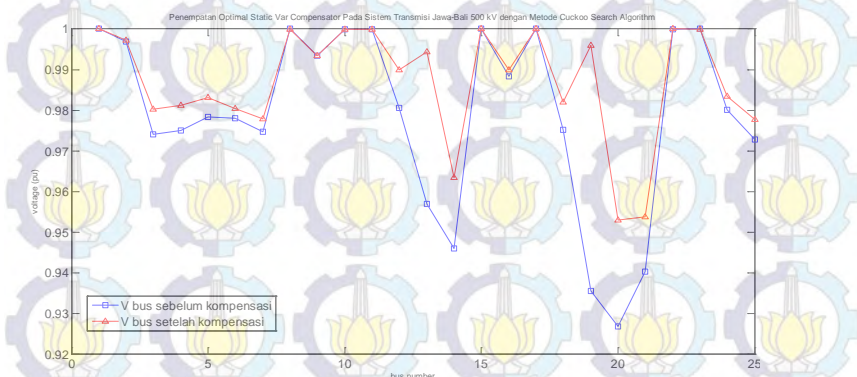
Gambar C.5 Grafik Hasil Running Ke-5 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100



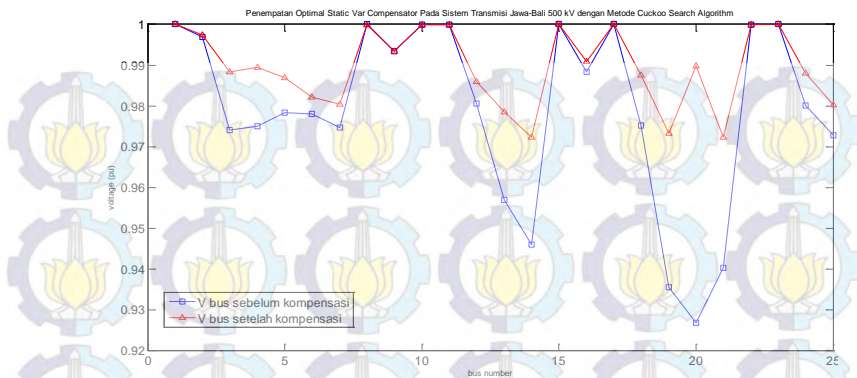
Gambar C.6 Grafik Hasil Running Ke-6 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100



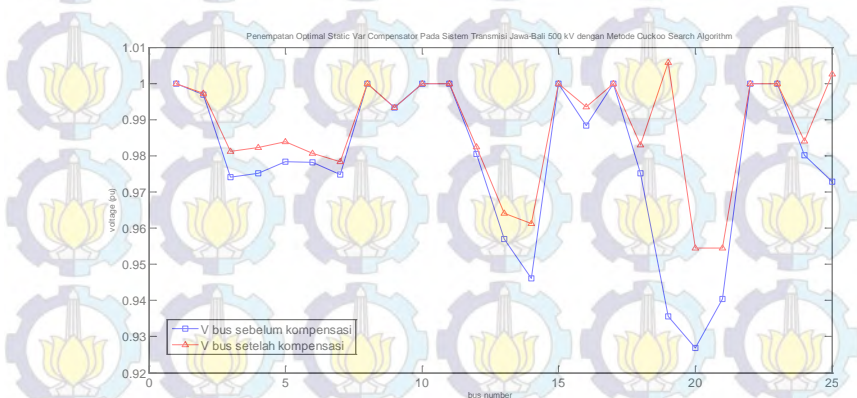
Gambar C.7 Grafik Hasil Running Ke-7 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100



Gambar C.8 Grafik Hasil Running Ke-8 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100



Gambar C.9 Grafik Hasil Running Ke-9 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100



Gambar C.10 Grafik Hasil Running Ke-10 Profil Tegangan Simulasi SVC n = 100

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. P. Power System Stability And Control, California,USA: McGraw-Hill. Inc, 1994.
- [2] X. S. Yang and S. Deb, "Cuckoo search via Lévy flights," *IEEE*, vol. NaBIC 2009, no. In Nature & Biologically Inspired Computing, pp. 210-214, 2009.
- [3] I. Robandi, "Desain Sistem Tenaga Modern," in *Optimasi, Logika Fuzzy, Algoritma Genetika*, Yogyakarta, Penerbit Andi Offset, 2006, p. 434.
- [4] D. Marsudi, Operasi Sistem Tenaga Listrik, Jakarta: Balai Penerbit & Humas ISTN, 2008.
- [5] SCILLC, Power Factor Correction Handbook, 2011.
- [6] F. semiconductor, Application Note 42047-Power Factor Correction (PFC) Basics, 2004.
- [7] R. Dugan, M. F. McGranaghn dan W. Beaty H., Electrical Power System Quality, McGraw-Hill, 1996.
- [8] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, Jr, "Power System Analysis," 1994, p. 218.
- [9] P. P. (PERSERO), Buku Pedoman Pemeliharaan KOMPENSASI DAYA REAKTIF STATIK(SVC), Jakarta Selatan, 2014.
- [10] S. Anwar, H. Suyono dan H. S. D., "Optimasi Penempatan SVC untuk Memperbaiki Profil Tegangan dengan Menggunakan Algoritma Genetika," *Jurnal Elektro ELTEK*, vol. 3, no. 1 April 2012, p. 2, 2012.
- [11] U. E. M. H. Hocaoglu and T. Y. , "Transmission line shunt and series compensation with voltage sensitive loads," *International Journal of Electrical Engineering Education* 46/4, vol. 46/4.
- [12] F. A. A.Chandra, I. S. H. dan R. S. Wibowo, "ANALISIS ALIRAN DAYA MENGGUNAKAN METODE PROBABILISTIK PADA SISTEM INTERKONEKSI 500 KV

JAWA-BALI,” *JURNAL TEKNIK POMITS*, vol. 1, no. 2013, pp. 1-6, 2013.

- [13] E. Hosea dan Y. Tanoto, “Perbandingan Analisa Aliran Daya dengan Menggunakan Metode Algoritma Genetika dan Metode Newton-Raphson,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 4, no. 2004, p. 2, 2004.
- [14] X. S. Yang, “NATURE-INSPIRED METAHEURISTICS,” dalam *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Second Edition*, University of Cambridge, United Kingdom, University of Cambridge, United Kingdom, 2010, pp. 4-9.
- [15] X. S. Yang, dalam *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Second Edition*, University of Cambridge, United Kingdom, Luniver Press, 2010, pp. 105-109.
- [16] W. E. Feeney, J. Troschianko and N. E. Langmore, Evidence for aggressive mimicry in an adult brood parasitic bird, Cape Town, South Africa: ST-NRF Centre of Excellence at the Percy FitzPatrick Institute.
- [17] K. P. Nguyen, G. Fujita and V. N. Dieu, "Optimal Placement and sizing of Static Var Compensator Using Cuckoo Search Algorithm," in *Evolutionary Computation (CEC), 2015 IEEE Congress*, 2015.
- [18] M. Gitizadeh, M. S. Pilehvar and M. Mardaneh, "A new method for SVC placement considering FSS limit and SVC," *ELSEVIER*, vol. Electrical Power and Energy Systems 53, no. 6 JUNE 2013, p. 2, 2013.
- [19] S. A. Energy Sector, Discover the World of FACTS Technology Technical Compendium, Erlangen, Germany, 2010.

RIWAYAT PENULIS



MUHAMMAD JANUAR FATHONI, lahir di Surabaya, 20 Januari 1993. Penulis tamat dari bangku sekolah dasar di SDN Sidokare II Sidoarjo pada tahun 2005 dan melanjutkan di sekolah menengah pertama di SMPN 2 Sidoarjo, lulus tahun 2008. Setelah lulus SMP, penulis melanjutkan sekolah ke SMAN 2 Sidoarjo. Pada tahun 2011, penulis melanjutkan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya jurusan Teknik elektro dan mengambil konsentrasi dalam Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga. Anak kedua dari tiga bersaudara dari orang tua Bapak Suharto dan Zulia ini aktif dalam berbagai kegiatan, diantaranya Divisi WORKSHOP Teknik Elektro ITS, EEVENT Teknik Elektro ITS. Selain itu beberapa prestasi yang pernah diperoleh penulis antara lain medali perak PIMNAS 25 Yogyakarta kategori PKM-M, medali emas PIMNAS 26 Mataram kategori PKM-T, Juara 1 LKTI Alternatif Energy Competition Teknik Mesin ITS 2013. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email : m.januarfathoni@gmail.com